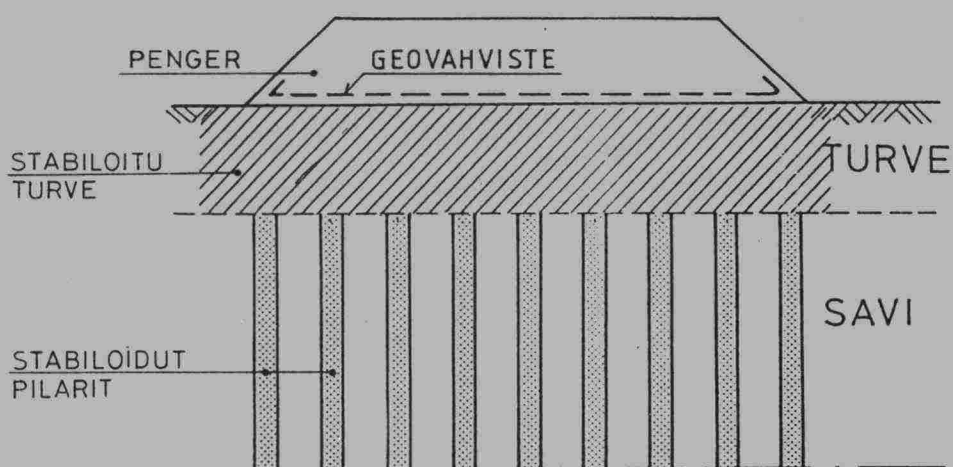


Vt 12 Veittostensuon syvästabilointi

Tutkimusraportti



Tielaitoksen
selvityksiä

81/1993

Oulu 1993

Geokeskus
Oulun kehitysyksikkö

Tielaitoksen selvityksiä
81/1993

Vt 12 Veittostensuon syvästabilointi

Tutkimusraportti

Tielaitos
Geokeskus, Oulun kehitysyksikkö

Oulu 1993

ISSN 0788-3722
ISBN 951-47-8761-7
TIEL 3200205
Painatuskeskus Oy
Helsinki 1994

Julkaisua kustannus ja myynti:
Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,
painotuotepalvelut
Telefax (90) 1487 2652

Tielaitos

Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puh. vaihde (90) 148 721

Geokeskus
Oulun kehitysyksikkö
Kansankatu 47
PL 261
90101 OULU
Puh. (981) 310 9383

Vt 12 Veittostensuon syvästabilointi. Tutkimusraportti. [Djupstabilisering i Veittostensuo. Forskningsrapport, Deep Stabilization at Veittostensuo. Research Report]. Tielaitos, geokeskus, Oulun kehitysyksikkö. Helsinki 1993. Tielaitoksen selvityksiä 81/1993. 87 s. TIEL 320 0205, ISBN 951-47-8761-7, ISSN 0788-3722

Aiheluokka: 53,62

Asiasanat: tienrakennus, pohjarakennus, syvästabilointi, turve, savi

Tiivistelmä

Tielaitoksen Geokeskuksen Oulun kehitysyksikön "Pohjanvahvistukset suo-alueilla"-kehitysprojektiin on kuulunut turpeen varaan tehtävän tien rakennusteknologian kehittäminen. Tässä tutkimusraportissa on esitetty vt 12 Veittostensuon kehityshankkeen tutkimustulokset.

Veittostensuo on noin 200 ha:n laajuinen suoalue, jonka ylittää 1,2 km:n matkalla Kouvolan ja Lahden välille suunnitteilla oleva valtatie 12 moottoriliikennetielinja. Veittostensuuta voidaan pitää pohjasuhteiltaan erittäin vaativana pohjarakennuskohteena. Maaperältään alue muodostuu 3-5 m paksusta turvekerroksesta, jonka alla on 10-20 m paksuinen pehmeä normaalisti konsolidoitunut savikerros ($w=75-125\%$, $s_v=7-15$ kPa).

Veittostensuon ylittämisen pohjanvahvistusmenetelminä tarkasteltiin yleisuunnitteluvaiheessa useita eri menetelmiä, joista valittiin jatkotarkasteluihin pohjaantäyttö sekä syvästabilointi. Menetelmien kustannuksiksi arvioitiin tiesuunnitelmatarkkuudella pohjaantäytön osalta 25.4 milj.mk sekä syvästabiloinnin kustannuksiksi 33.3 milj.mk. Tiesuunnitelmavaiheen kustannusarviota on tarkennettu koepenkereen rakentamisesta saatujen tulosten perusteella. Stabiloidun ratkaisun lasketut kustannukset vastaavat nyt pohjaantäytön kustannuksia. Jatkosuunnittelun kannalta pohjaantäytön sekä stabiloidun ratkaisun ympäristövaikutusten arvioinnilla on siten keskeinen merkitys.

Keväällä 1992 käynnistetyn kehitysprojektin ensimmäisessä vaiheessa tehtiin laboratoriossa stabiloituvuuskokeet sekä turpeelle että savelle sopivimman sideaineen ja sideainemäärän selvittämiseksi. Stabiloituvuuskokeissa saatiin parhailla sideaineilla savella keskimäärin 10-40 kertaisia leikkauslujuuksia ja turpeella keskimäärin 10-20 kertaisia leikkauslujuuksia luonnontilaiseen lujuteen verrattuna. Stabiloituvuustutkimuksiin sisältyivät myös aika-lujittumiskokeet sekä ödometri- ja kolmiakselikokeet.

Stabiloituvuuskoetulosten perusteella rakennettiin keväällä 1993 täysimittakaavainen instrumentoitu koepenger, jossa tutkittiin ensimmäistä kertaa Suomessa turpeen stabilointia luonnontilaisissa olosuhteissa. Turpeen osalta stabilointi toteutettiin uudella lamellistabilointimenetelmällä ja saven osalta tavanomaisina syvästabilointipilareina.

Pilaroinnin lujittumistutkimusten ja penkereen painumaseurannan perusteella voidaan todeta, että koerakenne on täyttänyt sille asetetut tavoitteet. Lujittuminen on tapahtunut sekä saven että turpeen osalta suunnitellulla tavalla. Rakenteen painumat ovat tapahtuneet nopeasti kuormituslisäyksen jälkeen.

Key words: road construction, foundation engineering, deep stabilization, peat, clay

Abstract

This report is a part of a larger research project "Soil improvement methods in peatlands", which is done in The Road Research Unit Of Oulu, Finnish National Road Administration, Geotechnical Services. The report deals with the research project of stabilization of peat and clay in Veittostensuo.

Veittostensuo is a 200 ha swamp area in southern Finland. There is a plan to build a new highway between the cities of Kouvola and Lahti which will cross the Veittostensuo swamp at a total length of 1.2 km. Veittostensuo can be considered as a very demanding foundation site. The site consists of a 3-5 m thick layer of peat and a 10-20 m thick layer of normally consolidated soft clay ($w=75-125\%$, $s_u=7-20$ kPa).

Many different soil improvement methods were observed during the design process. Soil replacement by squeezing and deep stabilization were chosen to be the most potential soil improvement methods in Veittostensuo. The total costs of soil replacement by squeezing was estimated to be 25.4 million FIM and deep stabilization of clay would cost 33.3 million FIM. The cost estimate was revised on the basis of the construction costs of the test embankment. The costs of the stabilized construction was found to be equal to soil replacement by squeezing. So the environmental effects will have a remarkable importance in the future when comparisons between the observed methods are made.

A research project was started in spring 1992 to develop technology to stabilize peat in situ and in that way, possibly minimize the foundation costs. In the first stage of the research project stabilization tests were made in laboratory to find out the most suitable stabilizers and to optimize the amount of the agent for peat and clay. The measured shear strengths of stabilized samples have increased by a factor of 10-40 in clay and 10-20 in peat. Stabilization tests included also analyzes of strengthening with time, oedometer tests and triaxial tests.

Because the stabilization test results in laboratory were encouraging a full scale trial embankment, which shall be part of the new highway, was constructed in spring 1993. For the first time in Finland, an effort to stabilize peat in situ was made. The stabilization of peat was done by making lamelblocks and stabilization of clay by using normal columns.

The test embankment was instrumented to analyze the behaviour of the stabilized peat and clay layers. The control measurements for strength development and deformations showed, that the test embankment has fulfilled its purposes. The strength development of stabilized soil has been as expected and the settlements have taken place quickly after construction.

ALKUSANAT

Suomen maa-alasta yli 30 % on turpeen peitossa, minkä vuoksi tie- ja muut yhdyskuntarakenteet joudutaan usein perustamaan turvepehmeikölle. Tien rakentamisessa turvepehmeikkö korvataan tavallisesti joko massanvaihdolla tai paaluperustuksella. Syynä tähän on turpeen huono kantavuus ja suuri kokoonpuristuvuus. Lisäksi käytöstä on puuttunut menetelmä, jolla turvepehmeikkö olisi pystytty lujittamaan rakenteeseen kelpaavaksi. Massanvaihto ja paalutus ovat monin paikoin suhteellisen kalliita ja hitaita toteuttaa. Tämän vuoksi turpeen paikallarakentamisen tutkimus- ja kehitystyö on tarpeen.

Veittostensuon kehityshankkeen tarkoitus on ollut edistää turpeen syvästabilointiteknologian kehitystä. Se on täyttänyt sille asetetut tavoitteet hyvin. Kehityshankkeen maasto- ja laboratoriotutkimusten pohjalta suunniteltiin Veittostensuolle koepenger, jossa turvetta stabiloitiin käytännössä ensimmäistä kertaa Suomessa. Tätä voidaan pitää merkittävänä edistysaskeleena turverakentamisen kehitykselle. Tutkimus on jo nyt herättänyt mielenkiintoa ja aktivoinut turvestabiloinnin laite- ja sideainekehitystä.

Veittostensuon tutkimus- ja kehitystyön päävastuullisena konsulttina toimi Viatek-Yhtiöt Oy. Laboratoriotutkimukset tehtiin pääosin Suomen Geotutkimus Oy:n laboratoriossa. Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriossa määritettiin diplomityönä luonnontilaisen ja stabiloidun turpeen sekä stabiloidun saven mitoitusparametrit lopullisia laskelmia varten. Koepenkereen rakensi YIT-Yhtymä Oy normaalin urakkakäytännön mukaisesti. Koejärjestelyihin ja laadun seurantaan osallistui myös Kymen tiepiirin henkilökuntaa.

Tutkimus- ja kehitystyötä on ohjannut hankesuunnittelusta vastaava asiantuntijaryhmä. Ryhmään ovat kuuluneet suunnittelupäällikkö Juha Kosonen ja dipl.ins. Jorma Aholainen Kymen tiepiiristä sekä dipl.ins. Matti Kolhinen tielaitoksen geokeskuksesta. Konsultteja ryhmässä ovat edustaneet dipl.ins. Mikko Leppänen Viatek Tapiola Oy:stä ja dipl.ins. Pentti Lahtinen SGT Oy:stä. Lisäksi asiantuntijana on ollut tekn. toht. Kauko Kujala Oulun yliopistosta. Tutkimusprojektin vetäjänä on toiminut ins. Heikki Vesa Oulun kehitysyksiköstä.

Oulussa joulukuussa 1993

Geokeskus

Oulun kehitysyksikkö

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	9
2 SYVÄSTABILOINTI OSANA VALTATIE 12 SUUNNITTELUA	10
2.1 Suunnittelukohde	10
2.2 Pohjarakennusvaihtoehtojen teknistaloudellinen tarkastelu	10
3 VEITTOSTENSUON POHJATUTKIMUKSET	13
3.1 Pohjatutkimusmenetelmät	13
3.1.1 Maastotutkimukset ja näytteenotto	13
3.1.1.1 Kairaukset	13
3.1.1.2 Maatutkaluotaus	13
3.1.1.3 Näytteenotto	13
3.1.2 Laboratoriotutkimukset	16
3.1.2.1 Turpeen tutkimusmenetelmät	16
3.1.2.2 Saven tutkimusmenetelmät	16
3.2 Pohjasuhteet	17
3.2.1 Kuvaus pohjasuhteista	17
3.2.2 Turvekerroksen ominaisuudet	18
3.2.3 Savikerroksen ominaisuudet	21
4 STABILOITUVUUSTUTKIMUKSET	23
4.1 Stabiloitavien maakerrosten valintaperusteet	23
4.2 Sideaineet ja tutkimusmenetelmät	24
4.2.1 Tutkimuksessa käytetyt sideaineet	24
4.2.2 Tutkimusmenetelmät	24
4.2.3 Näytteiden valmistus	25
4.3 Tutkimuksen toteutus vaiheittain	27
4.4 Stabiloititutkimusten tulokset	29
4.4.1 Stabiloitun turpeen ominaisuudet	29
4.4.1.1 Turpeen stabiloituvuus	29
4.4.1.2 Stabiloitun turpeen lujuuteen vaikuttavat tekijät	31
4.4.1.3 Stabiloitun turpeen mitoitusparametrit	42
4.4.1.4 Stabiloitun turpeen vedenpidätyskyky	46
4.4.2 Stabiloitun saven ominaisuudet	47
4.4.2.1 Savikerrosten stabiloituvuuden arviointi	47
4.4.2.2 Stabiloitun saven lujuuteen vaikuttavat tekijät	49
4.4.2.3 Stabiloitun saven mitoitusparametrit	54
4.5 Sideaineen valinta koerakenteisiin	57

5 KOERAKENTAMINEN VEITTOSTENSUOLLA	58
5.1 Koerakenteiden suunnittelu ja toteutus	58
5.1.1 Koerakentamisen tavoitteet	58
5.1.2 Koerakenteen sijainti ja pohjasuhteet	58
5.1.3 Koerakenteen suunnittelu ja mitoitus	59
5.1.4 Rakenneratkaisut ja toteutus	63
5.2 Koerakenteiden seurantatutkimukset	66
5.2.1 Koerakenteiden painumamittaukset	66
5.2.2 Stabiloitujen kerrosten lujuus	66
5.2.3 Sideainetutkimukset	73
6 SYVÄSTABILOINNIN KILPAILUKYKY	82
6.1 Stabilointivaihtoehtojen kustannukset	82
6.2 Stabiloinnin ja massanvaihdon kustannusvertailu	83
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	84
8 JATKOTUTKIMUSTARPEET	86
9 KIRJALLISUUSLUETTELO	87

1 JOHDANTO

Tielaitoksen Geokeskuksen Oulun kehitysyksikön "Pohjanvahvistukset suo-alueilla" -kehityshankkeeseen on kuulunut turpeen varaan tehtävän tien rakennusteknologian kehittäminen. Kehitystyön tutkimus- ja koekohteeksi valittiin vuonna 1989 vt 4:n Rantsilan ohikulkutie.

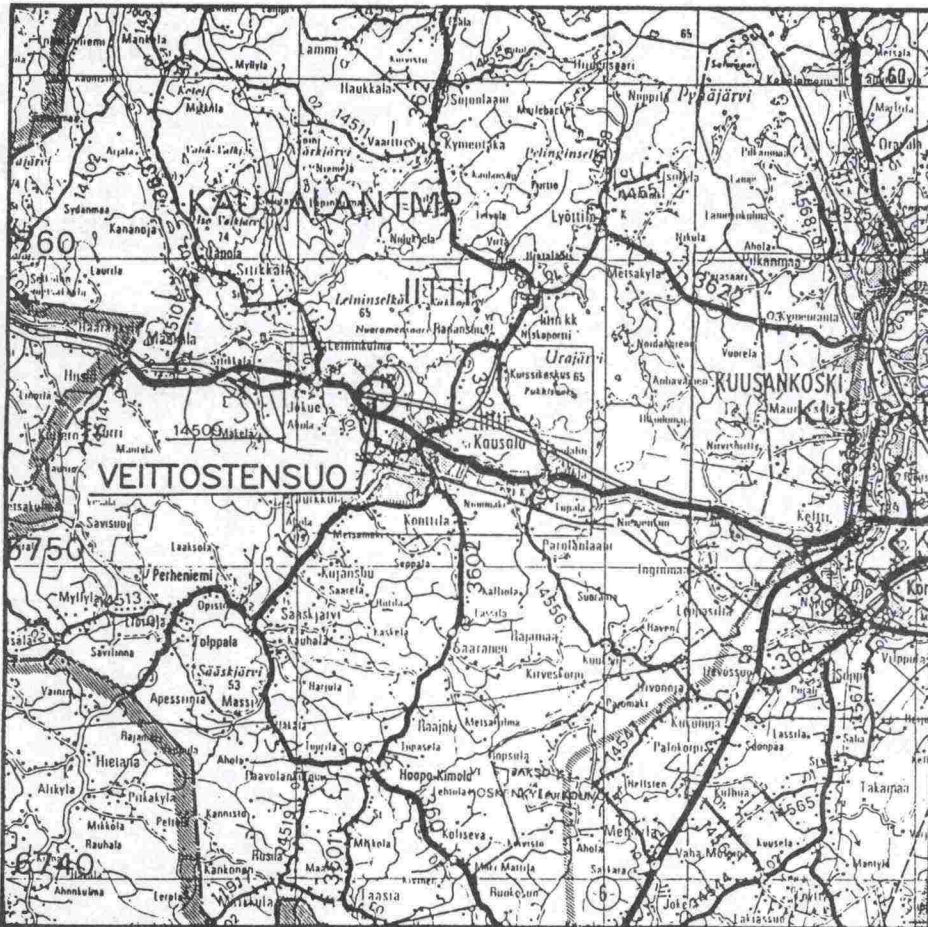
Rantsilan kohteessa tutkittiin useita erilaisia rakenneratkaisuja. Tutkituista vaihtoehdoista turpeen stabilointiin perustuvat ratkaisut olivat sekä laadullisesti että taloudellisesti kilpailukykyisiä. Turpeen stabilointiin voidaan helposti yhdistää myös muita pehmeikkörakentamistoimenpiteitä, joista merkittävimpiä ovat turvekerrosten alapuolisen saven syvästabilointi sekä kevennysten ja geovahvisteiden käyttö penkereessä. Rantsilan tutkimuksen tavoite oli löytää turpeen stabilointiin teknisesti hyvin toimivia ja edullisia sideainevaihtoehtoja. Turpeen sideaineina tutkittiin yleisementtiä ja poltettua kalkkia sekä runkoaineena masuuni- ja teräskuonaa. Laboratoriossa tehdyt tutkimukset antoivat alustavan käsityksen turpeen stabilointiin sopivista sideainelaaduista ja käytettävistä määristä jatkotutkimuksia varten. Kun Rantsilan kohteen aikataulu siirtyi kauemmas tulevaisuuteen, valittiin Veittostensuo jatkotutkimuskohteeksi. Rantsilan koekohteen tutkimukset on esitetty raportissa: "Koerakenteita turve- ja silttipehmeikölle, Esisuunnittelu, Vt 4 Rantsila" (Tiehallituksen sisäisiä julkaisuja 39/1991).

Veittostensuon kehitystyön ensisijaisena tavoitteena oli suunnitella suolle massanvaihdon kanssa kilpailukykyinen rakenneratkaisu, missä turve- ja savikerrokset lujitetaan stabiloimalla. Toisena tärkeänä tavoitteena oli edistää nykyistä ja tulevaa syvästabiloinnin suunnittelua ja toteutusta.

2 SYVÄSTABILOINTI OSANA VALTATIE 12 SUUNNITTELUA

2.1 Suunnittelukohde

Kymen tiepiirissä on suunnitteilla valtatie 12 parantaminen moottoriliikennetieksi välillä Jokue - Tillola. Suunnitteluosuus Jokue - Tillola on pohjasuhteiltaan vaativa. Osuudella sijaitsee 1,2 km:n pituinen Veittostensuon pehmeikkö, jossa turve- ja savikerrosten maksimipaksuus on noin 25 m. Muita valtatie 12 parantamistyöhön kuuluvia geoteknisesti vaativia pohjarakennuskohteita ovat Luhdan peltopehmeikkö ja alikulkujen perustustyöt. Uusi tielinja ylittää Veittostensuon nykyisen tien pohjoispuolelta noin kilometrin etäisyydellä vanhasta tielinjasta (kuva 1).



Kuva 1. Veittostensuon sijainti

2.2 Pohjarakennusvaihtoehtojen teknistaloudellinen tarkastelu

Yleissuunnitteluvaiheessa Veittostensuon pohjarakennusratkaisuksi esitettiin pengerlaattaa, jonka kustannusarvio oli noin 50 milj.mk. Koska nykyiset rakennusmenetelmät mahdollistavat kilpailukyisiä tierakenteita, päätti Kymen tiepiiri selvittää myös muiden rakenneratkaisujen käyttömahdollisuutta Veittostensuon rakentamisessa. Veittostensuon pohjanvahvistusratkaisuina tarkasteltiin seuraavia vaihtoehtoja:

- paalutus
- pohjaantäyttö
- syvästabilointi
- pystyjoitus
- painuva pengerrus
- geovahvistukset
- arinarakenne
- turpeen stabilointi
- sähköosmoosi
- alipainemenetelmä
- ponttoonisilta.

Tiesuunnitteluvaiheessa täydennettiin pohjatutkimuksia, joiden pohjalta laadittiin Veittostensuon pohjarakennusolosuhteita kuvaavat kuormitus- ja painumakäyrät. Kutakin pohjanvahvistusratkaisua arvioitiin sen mukaan, millä toimenpiteillä ja kustannuksilla se täyttää Veittostensuon painuma- ja stabiliteettivaatimukset. Lisäksi arvioitiin menetelmän rakennusaikaa, rakennusaikaisia riskejä, rakenteen kestoikää ja sen vaatimia kunnossapitotoimia. Yhteenvedo rakennevaihtoehtojen vertailusta on esitetty taulukossa 1.

Pohjanvahvistusmenetelmien yksityiskohtaiset tarkastelut on esitetty raportissa: "Vt 12 välillä Jokue - Tillola, Veittostensuon geotekniikka, Yleissuunnitelma" (Viatek Tapiola Oy 26.2.1992).

Teknitaloudellisen tarkastelun perusteella jatkosuunnitteluun valittiin pohjaantäyttö ja syvästabilointi. Syvästabilointi arvioitiin kilpailukykyiseksi, mikäli stabiloinnilla saataisiin turpeelle 50 kPa ja savelle 100 kPa lujuus. Rantsilan turvetutkimukset ja saven aikaisemmat stabilointikokemukset osoittivat, että nämä tavoitelujuudet voidaan käytännössä saavuttaa. Syvästabiloinnin taloudellisuus perustuu mahdollisimman matalan penkereen käyttöön, kun taas pohjaantäytössä penkereen korkeus on vapaammin valittavissa. Tasausviivan alemman sijainnin arvioitiin parantavan syvästabiloinnin kilpailukykyä. Tästä syystä jatkosuunnittelussa päätettiin selvittää pohjaantäyttöön ja syvästabilointiin liittyvät riskit sekä tasausviivan ja ympäristötekijöiden vaikutus menetelmän käyttöön. Kahden rinnakkaisen menetelmän ja tasauksen selvittäminen oli perusteltua myös siksi, että menetelmien vaihtoehtovertailusta puuttuivat lopulliset massatalous- ja ympäristöselvitykset.

Pohjaantäyttö on tierakennuksessa perinteinen ja yleisesti käytetty menetelmä, jonka soveltuvuutta Veittostensuon rakentamiseen selvitettiin hankesuunnittelun yhteydessä. Syvästabiloinnista Veittostensuon kaltaisissa olosuhteissa on hyvin vähän tietoa. Siksi sen käyttömahdollisuutta Veittostensuolla päätettiin tutkia erillisenä kehityshankkeena. Kehityshanke oli olennainen osa valtatie 12 suunnittelua. Tutkimustyöstä saatiin mahdollisimman suuri hyöty, kun se toteutettiin samanaikaisesti muun geoteknisen hankesuunnittelun kanssa. Hanketason suunnittelu ohjasi tutkimustyötä olennaisesti kysymyksiin. Toisaalta kehityshankkeesta saatiin tietoa, jota voitiin käyttää välittömästi hankesuunnittelussa. Kehityshankkeen stabiloituvuustietoja on hyödynnetty mm. Luhdan peltopehmeikön suunnittelussa.

Taulukko 1. Rakennevaihtoehtojen teknistaloudellinen vertailu.

Menetelmä	Edut	Haitat/riskit	Kust. milj. mk
<u>Paalutus</u>	- painumaton rakenne - tasauksen valinta vapaa	- vaatii vinopaalut - kallis rakentaa	53
<u>Pohjaantäyttö</u>	- painumaton rakenne - tasauksen valinta vapaa - selkeä suunnittelu	- suuret kaivu- ja täyttömangat - pohjaantäytön varmistaminen	25
<u>Syvästabilointi</u>	- lähes painumaton rakenne - tasauksen lasku kevytsora- ratkaisussa mahdollista	- kaluston käyttö suolla - stabiilitavuuden selvitys	33
<u>Pystyöjitus</u>	- tasauksen lasku kevytsora- ratkaisussa mahdollista	- jälkipainuma - pitkä rakennusaika - ojen käyttäytyminen	21
<u>Painuva penger</u>	- tasauksen lasku kevytsora- ratkaisussa mahdollista	- suuret painumat - jatkuva kunnossapito	14
<u>Geovahvisteet</u>	- vakaa, tasaisesti painuva	- ei sovellu korkeaan penkereeseen - mitoitustarkkuus	42
<u>Arinarakenne</u>	- tasauksen lasku kevytsora- soraratkaisussa mahdollista - työtekniikoiden koestus- mahdollisuus	- suuret painumat - pitkä rakennusaika	17 - 21
<u>Turpeen stabilointi</u>	- säästää luonnonvaroja - lyhyt rakentamisaika	- painuva rakenne? - stabiilitavuuden selvitys	29
<u>Sähköosmoosi</u>	- tasauksen lasku parantaa soveltuvuutta	- painuva rakenne - vähän kokemuksia	50
<u>Alipainemenetelmä</u>	- tasauksen lasku parantaa soveltuvuutta	- painuva rakenne - maksimi syvyys 6 m	40 - 45
<u>Ponttoonisilta</u>	- painumaton - lyhyt rakentamisaika	- korroosio - detaljisuunnittelu - veden pinnan lasku	50

3 VEITTOSTENSUON POHJATUTKIMUKSET

3.1 Pohjatutkimusmenetelmät

3.1.1 Maastotutkimukset ja näytteenotto

3.1.1.1 Kairaukset

Maaperäkairauksilla selvitettiin Veittostensuon maakerrosten paksuuksia ja suhteellisia lujuusvaihteluja. Kymen tiepiiri oli tehnyt jo yleissuunnitteluvaiheessa alustavia paino- ja siipikairauksia, joita täydennettiin myöhemmin paino-, siipi- ja kierrekairauksilla. Turvekerroksen paksuuden alueellista vaihtelua selvitettiin kierrekairalla. Kierrekairalla otettiin turvenäytteitä poikkileikkauksittain 40 m:n välein koko Veittostensuon ylittävältä tieosalta.

3.1.1.2 Maatutkaluotaus

Kairaustulokset osoittivat, että turvekerrosten paksuudet vaihtelevat huomattavasti tielinjan eri kohdissa. Tämän vuoksi turve- ja savikerroksen rajapinta ja kovan pohjan sijainti tarkastettiin maatutkalla. Maatutkalla selvitettiin myös turvekerroksen puisuutta ja pohjan kivisyyttä. Luotauksessa käytettiin GSSI:n Sir-3 maatutkaa ja 100 MHz:n antennia. Tien eteläisen ajoradan keskilinja luodattiin plv:ltä 37480-38500. Lisäksi luodattiin noin 100 m:n pituiset poikkilinjat paaluilta 37900, 38120, 38140, 38160, 38240 ja 38300.

3.1.1.3 Näytteenotto

Häiriintyneet näytteet

Luokituskokeisiin savinäytteet otettiin yleissuunnitteluvaiheessa paaluilta 37600, 37900, 38400. Näytteet otettiin jatkuvina näytteinä norjalaisella 54 mm näytteenottimella noin 10-11 m:n syvyydelle. Myöhemmin näytteenottoa täydennettiin samoista pisteistä kovaan pohjaan saakka sekä lisäpisteestä pl:ta 38150.

Stabiloituvuustutkimuksiin turve- ja savinäytteet otettiin paalulta 38113 porakonekairalla, johon oli liitetty 67 mm näytteenotin. Näytteet otettiin taulukossa 2 esitetyiltä syvyyksiltä.

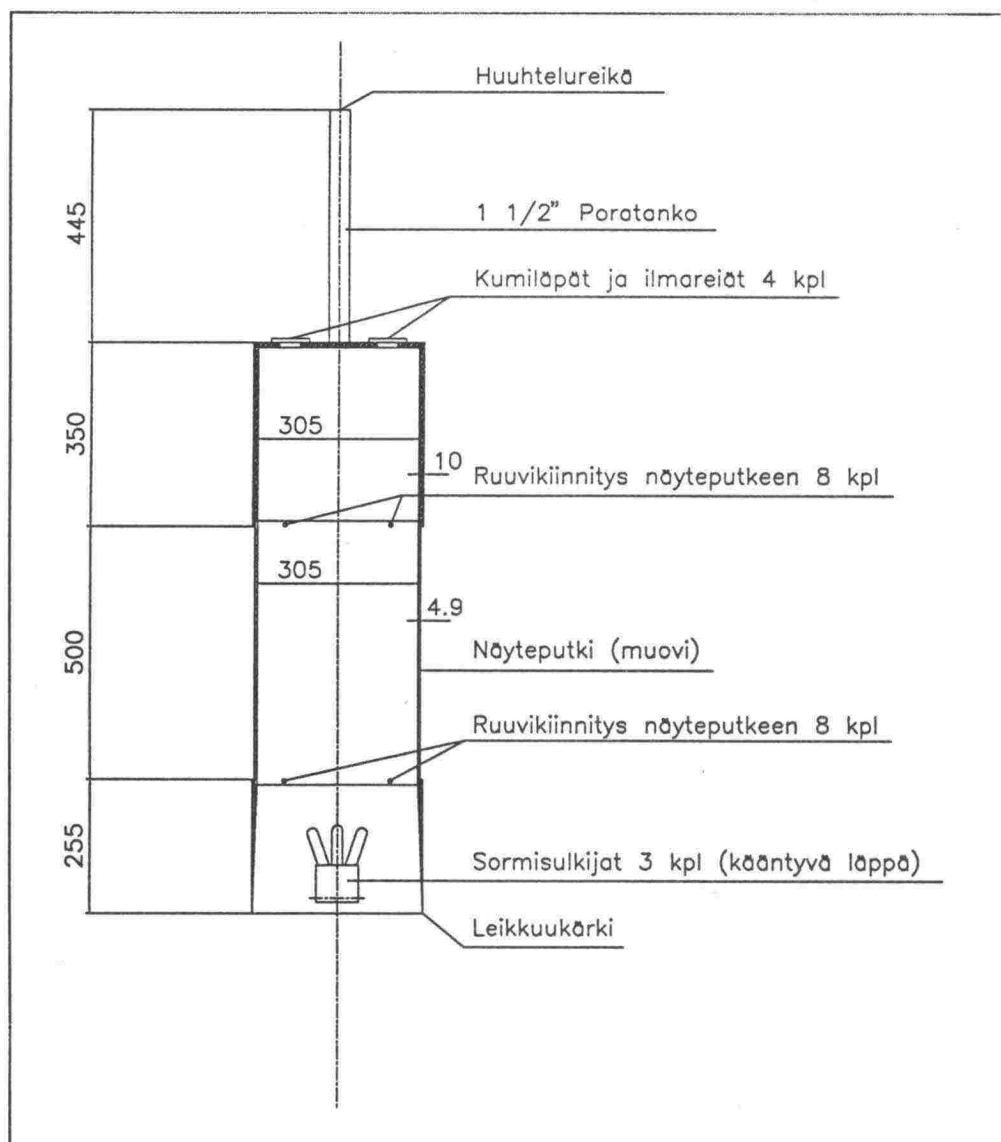
Taulukko 2. Turpeen ja saven häiriintyneiden näytteiden ottosyvyydet pl:ta 38113.

Maalaji/Syvyys (m)	
Turve	Savi
0,5 - 2	5 - 6
1 - 2	5,5 - 6,5
2 - 3	6 - 7
3 - 4	7 - 8
4 - 4,8	11 - 12
4,8 - 5	17,5 - 18,5

Häiriintymättömät näytteet

Savinäytteet lujuus- ja kokoonpuristuvuuskokeisiin otettiin kuten häiriintyneet näytteet yleissuunnitteluvaiheessa paaluilta 37600, 37900 ja 38400. Näytteenottosyvyys oli 10 - 11 m.

Turvenäytteet lujuus- ja kokoonpuristuvuustutkimuksiin otettiin syvyyksiltä 1 - 2 ja 3 - 4 m paalulta 38113. Kokoonpuristuvuuskokeessa Rowen sellissä käytettiin halkaisijaltaan 254 mm:n häiriintymättömiä turvenäytteitä, joiden ottoon nykyiset näytteenottimet eivät sovellu. Siksi tutkimuksen yhteydessä rakennettiin näytteenotin, jolla voitiin ottaa myös suuriläpimittaisia turvenäytteitä. Näytteenottimen rakenne on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Turpeen näytteenotin

Ottimen näytesylinterinä toimii muoviputki, jonka korkeus on 500 mm ja sisähalkaisija 305 mm. Kiinnitysalustan korkeus on 350 mm ja teräksestä valmistetun leikkuuterän 255 mm. Kiinnitysalustan umpinaisessa yläpäässä on 4 kpl kumiläpällä peitettyä ilmareikää. Reiät toimivat venttiileinä, jotka mahdollistavat näytteenottimen maahan painamisen aikana ilman ja vedenvirtaukset näytteenottimen läpi. Leikkuuterän alapäässä on 3 kpl saranoituja sulkijaläppiä, jotka sulkeutuvat näytteenottimen ylösnoston aikana ja estävät näytteen valumisen ulos näytesylinteristä.

Näytteenotin painettiin maahan juntaamalla sitä terävin iskuin monitoimikairalla (kuva 3). Kun näytteenotin saavutti halutun syvyyden, painaminen lopetettiin ja otin nostettiin varovasti ylös. Ylösnostettujen näytteiden päät sahattiin tasaiseksi ja näytesylinterien päät suljettiin muovikansilla.



Kuva 3. Häiriintymättömien turvenäytteiden ottaminen Veittostensuolta näytteenottimen ja monitoimikairan avulla.

3.1.2 Laboratoriotutkimukset

3.1.2.1 Turpeen tutkimusmenetelmät

Luokituskokeet

Turpeen luokitusominaisuuksista määritettiin vesipitoisuus, maatuneisuusaste, tilavuuspaino, kiintotiheys, happamuus ja tuhkapitoisuus (GLO 85, SGY 1985). Happamuus tutkittiin turpeesta puristetusta vedestä ja tilavuuspaino määritettiin kerosiinimenetelmällä.

Lujuus- ja kokoonpuristuvuuskokeet

Luonnontilaisen turpeen lujuus- ja kokoonpuristuvuusominaisuuksia tutkittiin kolmiaksiaali- ja ödometrikokeella.

Kolmiaksiaalikokeen koetyypinä käytettiin CIDC-koetta (consolidated, isotropical, drained, compression test) eli näytteet konsolidoitiin aluksi isotrooppisesti, jonka jälkeen leikkaus suoritettiin avoimessa tilassa. Leikkausnopeus oli 0,0038 mm/min.

Kokoonpuristuvuusominaisuuksia tutkittiin Rowen sellillä pitkäaikaisina portaitaisina kokeina. Ödometrikoeohjelma on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Ödometrikoeohjelma luonnontilaiselle turpeelle.

Kuormitus (kPa)	Kuormitusaika (vrk)	
	KOE 1. Syvyys 1 - 2 m	KOE 2. Syvyys 3 - 4 m
5	3	3
10	3	3
20	3	3
40	7	7
80	7	14
160	-	7

Luonnontilaisen turpeen lujuus- ja kokoonpuristuvuuskokeiden järjestelyt ja suoritus on kuvattu yksityiskohtaisesti Mika Ahosen diplomityössä: "Stabiloidun turpeen mekaaniset ominaisuudet" (Oulun yliopiston geotekniikan laboratorio 1993).

3.1.2.2 Saven tutkimusmenetelmät

Luokituskokeet

Saven luokitusominaisuudet määritettiin ensin yleissuunnitteluvaiheessa. Myöhemmin luokituskokeita täydennettiin stabiloituvuustutkimuksia varten. Savesta tutkittiin happamuus, rikkipitoisuus, vesi- ja humuspitoisuus, plastisuus sekä rakeisuus (GLO-85, SGY 1985). Happamuus määritettiin pH-elektrodilla saven ja veden liuoksesta 1:1 ja rikkipitoisuus HCl-uutoksesta AAS-määrityksenä.

Lujuus- ja kokoonpuristuvuuskokeet

Saven lujuus- ja kokoonpuristuvuuskokeet tehtiin yleissuunnitteluvaiheessa. Suljettu leikkauslujuus ja sensitiivisyys sekä konsistenssirajat määritettiin GLO-85 mukaan.

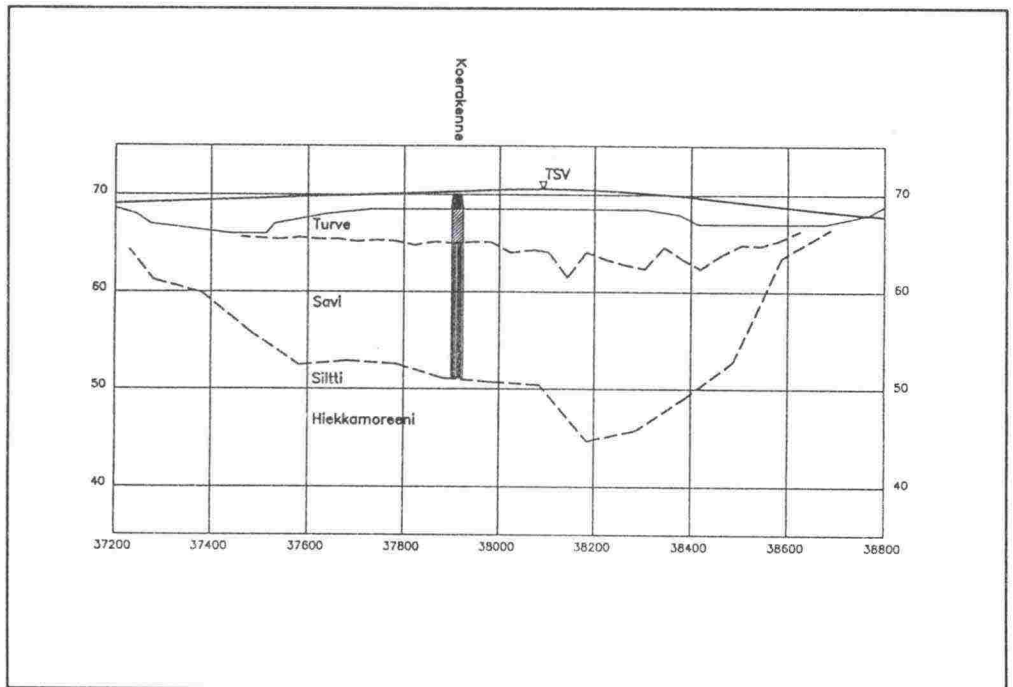
Kokoonpuristuvuusominaisuudet määriteltiin sekä vakiomuodonmuutosnopeudella 0,0025 mm/min että portaittaisilla ödometrikokeilla.

3.2 Pohjasuhteet

3.2.1 Kuvaus pohjasuhteista

Veittostensuo on noin 200 ha:n laajuinen suoalue, joka rajoittuu tielinjan kohdalla reunoistaan hiekka ja moreenirinteisiin. Pehmeikön pituus on noin 1,2 km ja kokoonpuristuvien maakerrosten enimmäispaksuus noin 25 m. Turpeen pinta on Veittostensuon keskellä reunaosia ylempänä eli kyseessä on ns. kohosuo. Maanpinnan korkeustaso suoalueella on yleisesti noin +68. Suon keskellä taso on enimmillään yli +69. Länsireuna on aikaisemmin toiminut turpeenottoaikkana, missä maanpinnan korkeus on noin +66 eli 3 m alempana kuin suon yleinen korkeustaso.

Pohjaveden pinnan korkeusvaihteluja seurattiin tiesuunnitteluvaiheessa asetetuista pohjavesiputkista. Pohjaveden pinnan korkeustaso on suon laidoilla noin +66 ja suon keskellä noin +68. Kuivatusteknisesti pohjavedenpintaa on mahdollista laskea koko suon alueella tasolle noin +66 - +67. Pohjaveden alentaminen kuivattaa maakerroksia ja helpottaa suolla liikkumista rakentamisen aikana.



Kuva 4. Veittostensuon pohjasuhteet.

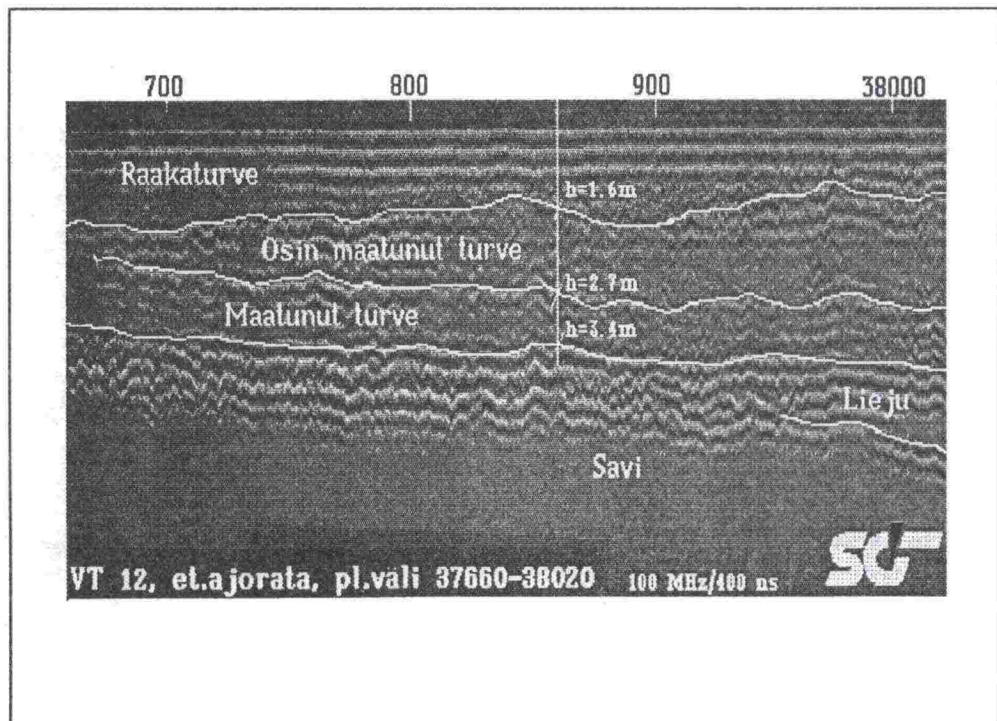
Veittostensuo on pohjasuhteiltaan vaativa rakennuskohde, jossa keskeiset ongelmat ovat paksu turvekerros ja voimakkaasti kokoonpuristuvat pehmeät savikerrokset. Alueen tyypillinen pohjasuhdeleikkaus on esitetty kuvassa 4.

3.2.2 Turvekerroksen ominaisuudet

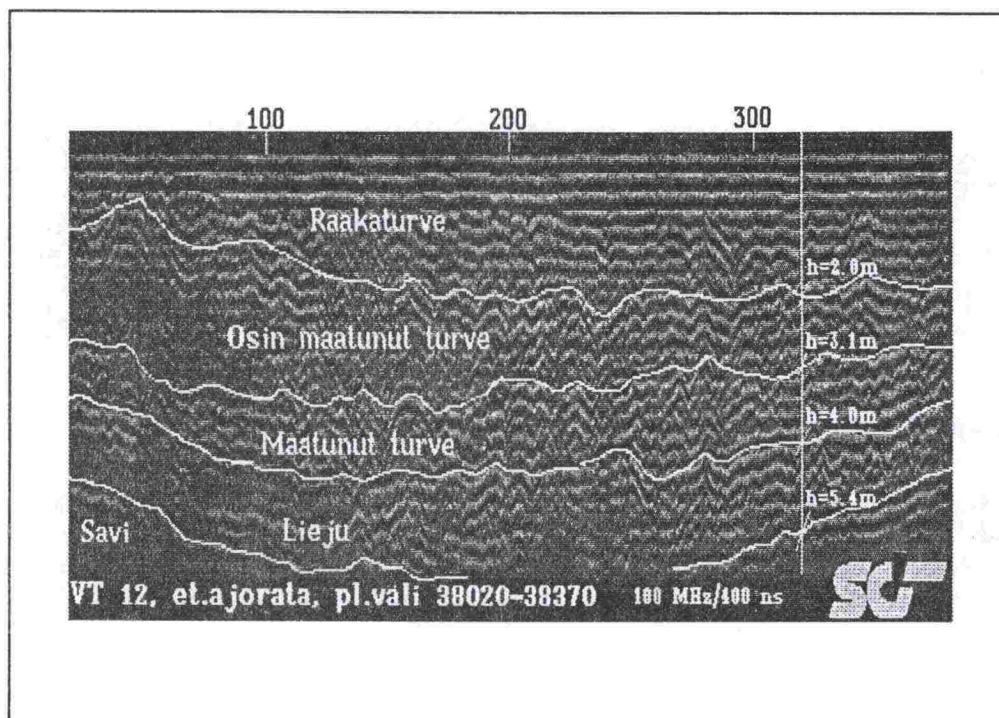
Kerrospaksuudet

Turvekerrosten paksuudet määritettiin maaperäkairauksella ja maatulilla. Maatulilla tielinjalla havaittiin useita eri asteisesti maatuneita turvekerroksia, joiden väliset rajat erottuivat paikoin selvästi ja välillä hävisivät lähes näkymättömiin. Suon pinnassa on raakaturvekerros, jonka paksuus vaihtelee 1,2 - 2,4 m. Raakaturpeen alla on paikoin kaksi turvekerrosta, joiden maatuneisuus kasvaa syvemmissä kerroksissa (kuva 5). Turpeen kokonaispaksuus tielinjan keskialueella vaihtelee 2,2 - 3,5 m. Paaluvälillä 32020 - 38370 on suon syvin kohta, missä turvekerroksen paksuus vaihtelee 3,5 - 5,1 m. Tällä kohtaa turpeen alapuolella on ohut liejakerros (kuva 6). Kierrekairalla paksuin turvekerros 7,2 m mitattiin pl:ta 38140. Luotaustuloksista selvisi myös, että pohjamaa ei sisällä kiviä eikä turvekerros maatumattomia puurunkoja ja juurakoita. Suo on kauttaaltaan pehmeäpohjainen lukuunottamatta suon reuna-alueita.

Maatulka soveltui hyvin kerrosten rajapintojen määrittämiseen, sillä mitatut kerrospaksuudet vastasivat kairaustuloksia.



Kuva 5. Tien eteläisen ajoradan keskilinjan luotausprofiili plv:ltä 37660-38020.



Kuva 6. Tien eteläisen ajoradan keskilinjän luotausprofiili plv:ltä 38020 - 38370.

Luokitusominaisuudet

Turpeen luokitusominaisuudet tutkittiin paalulta 38113 otetuista häiriintyneistä näytteistä. Maatuneisuus luokiteltiin silmämääräisesti värin ja koostumuksen perusteella. Raakaturpeen (RTv) maatumisaste vastasi von Postin asteikkoa H 1 - 3 ja keskinkertaisesti maatunut turve (Ktv) asteikkoa H 4 - 6. (Helenelund 1967). Luokituskokeiden tulokset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Turvekerrosten luokituskokeiden tulokset pl:ta 38113 otetuista näytteistä.

Syvyys (m)	pH	Vesipitoisuus (%)	Luokitus	Tilavuuspaino (kN/m ³)	Tuhkapitoisuus (%)
0,5 - 2		1 390	RTv	8,4	1,9
1 - 2	4,5	1 280	RTv	7,9	3,8
2 - 3		1 253	Ktv	16,3	1,3
3 - 4	4,7	1 670	Ktv	13,4	2,9
4 - 4,8		1 550	Ktv	19,6	20,0
4,8 - 5		283	Ktv + Sa		89,8

Turve on kohtalaisen hapanta ja happamuus vähenee (pH kasvaa) jonkin verran syvemmissä kerroksissa. Pieni tuhkapitoisuus syvyydellä 0,5 - 4 m tarkoittaa, että kerrosten eloperäisten aineiden määrä on suuri ja mineraali-ainesten osuus hyvin pieni. Näiden kerrosten vesipitoisuudet vaihtelevat välillä

1250 - 1670 %. Syvemmällä mineraaliaineksen määrä kasvaa. Syvyydellä 4,8 - 5,0 m on turpeen ja saven rajapinta, mistä on osoituksena vesipitoisuuden aleneminen ja tuhkapitoisuuden kasvu.

Raakaturpeen tilavuuspaino on alle 10 kN/m^3 ja keskinkertaisesti maatuneen turpeen $13 - 20 \text{ kN/m}^3$. Raakaturpeen tilavuuspaino on lähes sama kuin puun. Keskinkertaisesti maatuneen turpeen tilavuuspaino sijoittuu puisen materiaalin ja mineraaliaineksen tilavuuspainojen väliin. Tilavuuspaino- ja vesipitoisuus määritettiin myös häiriintymättömille näytteille. Geoteknisissä ja sideainelaskelmissa tilavuuspainoina käytettiin $9,5 - 9,8 \text{ kN/m}^3$ ja vesipitoisuutena 1000 - 1300 %.

Leikkauslujuus

Luonnontilaisen turpeen lujuusominaisuuksia tutkittiin pl:ta 38113 otetuista häiriintymättömistä näytteistä. Kolmiaksiaalikoete tehtiin raakaturpeesta (syvyys 1 - 2 m) ja keskinkertaisesti maatuneesta turpeesta (syvyys 3 - 4 m) sekä vertikaali- että horisontaalinäytteille. Turve käyttäytyi avoimessa kolmiaksiaalikokeessa myötölujittuvan ja löyhän materiaalin tavoin; deviatoorinen jännitys kasvoi ja näytteen tilavuus pieneni aksiaalisen muodonmuutoksen funktiona. Leikkauslujuusparametrit määritettiin 15 %:n muodonmuutoksella (taulukko 5). Vertikaalinäytteiden tehokkaat kitkakulmat olivat sekä raakaturpeessa (RTv) että keskinkertaisesti maatuneessa turpeessa (KTv) noin $\phi' = 20^\circ$. Horisontaalinäytteiden tehokkaat kitkakulmat olivat pienempiä. Tehokas koheesio kasvoi turpeen maatuneisuuden lisääntyessä (Ahonen 1993).

Taulukko 5. Luonnontilaisen turpeen lujuusparametrit.

Syvyys	Suunta	c' [kPa]	ϕ' [ast.]
1-2	V	0	20,3
	H	6,7	16,9
3-4	V	5,9	18,9
	H	17,9	9,9

Kokoonpuristuvuusominaisuudet

Luonnontilaisen turpeen ödometrikokeet tehtiin häiriintymättömillä näytteillä Rowen sellillä samoista kerroksista kuin lujuuskokeet. Kokoonpuristuvuusindeksiksi saatiin raakaturpeelle 9,22 ja keskinkertaisesti maatuneelle turpeelle 9,64. Empiirisellä yhtälöllä (Kogure et al.) saadaan kokoonpuristuvuusindeksiksi raakaturpeelle 12,7 ja keskinkertaisesti maatuneelle turpeelle 16,5. Keskinkertaisesti maatuneen turpeen kokoonpuristuvuusindeksi jäi alhaiseksi. Tähän vaikuttivat kokeen aikana tapahtuneet häiriöt koejärjestelyissä sekä näytteen korkea tuhkapitoisuus (Ahonen 1993).

3.2.3 Savikerroksen ominaisuudet

Lujuus- ja kokoonpuristuvuusominaisuudet

Saven lujuus- ja kokoonpuristuvuusominaisuuksia selvitettiin jo yleissuunnitteluvaiheessa sekä maasto- että laboratoriotutkimuksilla.

Siipikairalla määritetty leikkauslujuus vaihteli heikommassa pintakerroksessa 7 - 15 kPa ja syvimmissä kerroksissa 15 - 20 kPa. Kairaustuloksista ilmeni myös, että tielinjan alla noin 7 - 11 m syvyydellä kulkee ohut laiha savikerros. Saven kokoonpuristuvuutta tutkittiin paaluilta 37600, 37900 ja 38400 otetuista näytteistä. Savi osoittautui erittäin kokoonpuristuvaksi sekä pinta- että pohjakerroksissa.

Yleissuunnitteluvaiheen maasto- ja laboratoriotutkimusten tulokset on esitetty raportissa: "Vt 12 välillä Jokue - Tillola, Veittostensuon geotekniikka, Yleissuunnitelma, Laboratoriotutkimukset" (Viatek Tapiola Oy 26.2.1992).

Luokitusominaisuudet

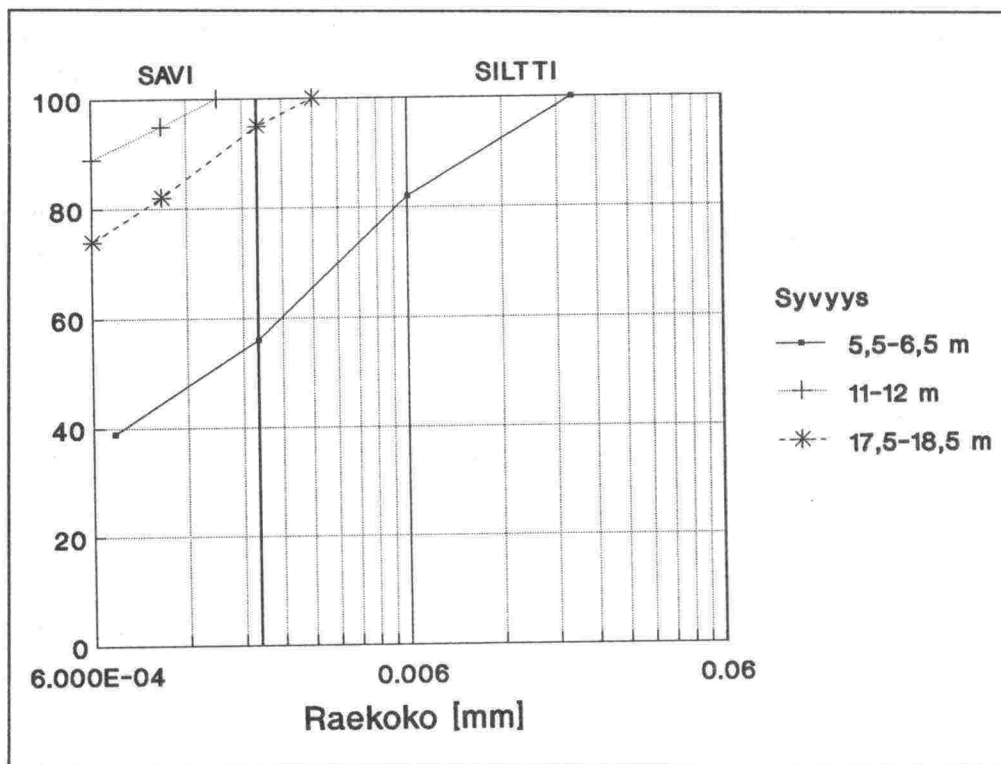
Yleissuunnitteluvaiheessa saven luokitusominaisuudet määritettiin pl:lta 37600, 37900 ja 38400 otetuista näytteistä. Nämä tulokset on esitetty em. yleissuunnitteluvaiheen tutkimusraportissa.

Stabiloituvuustutkimuksia varten saven luokitusominaisuudet määritettiin pl:lta 38113 otetuista häiriintyneistä näytteistä. Saven luokitusominaisuuksista rikki-, humus- ja vesipitoisuudet ovat syvyydellä 6 - 7 m selvästi muita kerroksia alhaisemmat. Syvyydellä 11 - 12 m nämä ominaisuudet ovat puolestaan muita kerroksia korkeammat. Saven happamuus alenee syvyyden funktiona ja on alimmassa kerroksessa lähes neutraalia (taulukko 7).

Rakeisuus määritettiin syvyyksiltä 5,5 - 6,5 m, 11 - 12 m ja 17,5 - 18,5 m. Rakeisuuden perusteella savi on lihavaa savea (LiSa) kaikissa kerroksissa ja saviaineksen määrä kasvaa alimmissa kerroksissa (kuva 7).

Taulukko 7. Savikerrosten luokituskokeiden tulokset pl:ta 38113 otetuista näytteistä.

Syvyys (m)	pH	Rikkipitoisuus (mg/kg)	Vesipitoisuus (%)	Humuspitoisuus (%)	Tilavuuspaino (kN/m ³)	Luokitus
4,8 - 5	5,2	128	283	11,5	-	KTv + Sa
5 - 6	5,3	275	73	0,7	15,2	liSa
5,5 - 6,5	5,3	227	95	2,3	14,9	ljSa
6 - 7	5,6	86	52	-	15,1	liSa
7 - 8	5,8	334	97	1,6	16,4	liSa
11 - 12	6,4	406	109	2,8	14,7	ljSa
17,5 - 18,5	6,7	281	91	0,5	16,5	liSa



Kuva 7. Savikerrosten rakeisuuskäyrät pl:ta 38113 otetuista näytteistä.

4 STABILOITUVUUSTUTKIMUKSET

4.1 Stabiloitavien maakerrosten valintaperusteet

Stabiloinnilla saavutettava lujittumistaso riippuu mm. stabiloitavan maan lukuisista eri fysikaalis-kemiallisista ominaisuuksista. Lujittumista ennakoivia ominaisuuksia ovat maalajin rakeisuus, vesipitoisuus, humuspitoisuus, plastisuus, rikkipitoisuus, kationinvaihtokapasiteetti, sähkönjohtokyky ja pH. Näiden ominaisuuksien avulla voidaan alustavasti arvioida eri kerrosten stabiloituvuutta ja rajata vaihtoehtoja. Sen sijaan mitoituksessa käytettävät lujuusparametrit määritetään stabiloituvuuskokeiden avulla (STO-91).

Stabiloitavien turve- ja savikerrosten valinta perustui maasto- ja laboratorio-kokeiden tuloksiin. Turpeen paksuudet ja alustavat rakenneominaisuudet selvitettiin maaperäkairauksilla ja maatutkalla sekä kierrekairanäytteillä. Näiden tulosten pohjalta arvioitiin alustavasti turve- ja savikerrostumien ominaisuuksia ja valittiin edustavat näytteenottopisteet, joista otettiin näytteet stabiloituvuustutkimuksiin. Tämän jälkeen turve- ja savikerrokset jaettiin edellä mainittujen luokitusominaisuuksien perusteella stabiloituvuudeltaan erilaisiin kerroksiin. Stabiloituvuustutkimuksiin valittiin kerrokset, joiden arvioitiin edustavan parhaiten koko turve- ja savikerrosta. Stabiloitaviksi valitut kerrokset on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Stabiloitavat turve- ja savikerrokset.

Maalaji	Kerros (m)
Turve	1 - 2 3 - 4
Savi	5,5 - 6,5 11 - 12 17,5 - 18,5

Stabiloituvuustutkimuksiin valituista turvekerroksista ylempi (syvyys 1 - 2 m) edusti raakaturvetta ja alempi (syvyys 3 - 4 m) keskinkertaisesti maatonuturvetta.

Savikerroksista syvyydet 5 - 6 m ja 6 - 7 m jätettiin pois stabiloituvuustutkimuksista, koska niiden arvioitiin lujittuvan parhaiten rikki-, humus- ja vesipitoisuuksien perusteella.

Valituista kerroksista syvyydet 5,5 - 6,5 m sisälsivät saviainesta 50 % ja niiden humuspitoisuus oli suhteellisen korkea.

Kerroksissa 11 - 12 m rikki-, humus- ja vesipitoisuudet olivat tutkituista kerroksista korkeimmat.

Saviaineksen määrä oli suurin kerroksissa 17,5 - 18,5 m. Näiden kerrosten arvioitiin edustavan hyvin tutkimuksista pois jätettäviä kerroksia.

4.2 Sideaineet ja tutkimusmenetelmät

4.2.1 Tutkimuksessa käytetyt sideaineet

Turpeen ja saven stabiloinnissa tutkittiin seuraavia sideaineita:

F	Finnstabi-B, Kemira Oy Vuorikemian tuote
CaO(N)	Nordkalkin poltettu kalkki
CaO(L)	Lohjan poltettu kalkki
Se	Yleissementti
PSe	Pikaseimentti
Maku	Granuloitu, jauhamaton masuunikuona (# 0-5 mm)
LT	Lentotuhka (68 % turve ja 32 % kivihiili)
Vki	Märkämenetelmällä tuotettu kipsi (Steinmüller-menetelmä), vastaa kemiallisilta ominaisuuksiltaan luonnonkipsiä
Rki	Märkä-kuiva -menetelmällä tuotettu rikinpoistolopputuote (Fläkt-Niro, Spray-kuivausmenetelmä)

4.2.2 Tutkimusmenetelmät

Leikkauslujuuden määrittäminen

Stabiloitujen turve- ja savinäytteiden yksiaksiaali- ja kolmiaksiaalikokeet tehtiin UU-kokeena (konsolidoimaton suljettu koe). Parametrit määritettiin kolmiaksiaalikokeella CIDC-kokeena, jossa käytettiin leikkausnopeutta 0,0668 mm/min (Ahonen 1993).

Kokoonpuristuvuus-lujuuskoe

Stabiloidut turvenäytteet esikonsolidoitiin ennen puristuskoetta. Näytteitä kuormitettiin portaittain eri suuruisilla kuormilla ja seurattiin ajan ja kuormituksen vaikutusta näytteen kokoonpuristumaan. Esikonsolidoinnin jälkeen näytteet koestettiin yksiaksiaalisella puristuskojeella.

Kokoonpuristuvuuden määrittäminen

Stabiloidun turpeen kokoonpuristuvuusominaisuuksia tutkittiin Rowen-sellillä pitkäaikaisina portaittaisina kokeina kuten luonnontilaisella turpeella.

Vedenpidätyskäyrän määrittäminen

Maan kyvystä sitoa vettä saadaan käsitys vedenpidätyskäyrän avulla. Vedenpidätyskäyrä kuvaa paine-eron ja maan vesipitoisuuden suhdetta. Tässä tutkimuksessa stabiloidun turpeen vedenpidätyskäyrät määritettiin painelevyeli pF-laitteella. Stabiloitu turve tiivistettiin näyterenkaisiin ($h \cdot d = 50 \text{ mm} \cdot 103 \text{ mm}$) ja asetettiin märälle alustalle, josta niihin imeytyi kapilaarisesti vettä. Kun näytteet olivat vedellä kyllästetyt, ne punnittiin ja laitettiin pF-laitteeseen painelevyjen päälle. Painelevylaitteessa näytteistä poistettiin vettä eri paineilla ja määritettiin vesipitoisuudet tasapainotilanteessa (Ahonen 1993).

4.2.3 Näytteiden valmistus

Sideaineet ja maanäytteet sekoitettiin pylväsporakoneeseen asennetulla sekoittimella. Ensin maanäyte sekoitettiin tasalaatuiseksi ilman sideainetta. Tämän jälkeen homogenisoituun maanäytteeseen lisättiin vähitellen sideaine ja sekoitusta jatkettiin niin kauan, että sideaine oli jakautunut tasaisesti näytteeseen.

Poltettua kalkkia (CaO) sisältävät näytteet lämpökäsiteltiin +40 °C lämpötilassa noin 0 - 2 h ja +20 °C lämpötilassa 2 - 48 h. Muilla sideaineilla stabiloituja näytteitä säilytettiin +20 °C lämpötilassa 0 - 48 h. Lämpökäsittelyn jälkeen näytteitä säilytettiin kylmähuoneessa +8 °C lämpötilassa koestushetkeen asti. Turpeen stabiloinnissa näytteen tilavuuspaino ja vesipitoisuus palautettiin luonnon olosuhteita vastaavaksi lisäämällä siihen suovettä. Näytteet valmistettiin ja koestettiin siten, että laboratoriokokeet kuvasivat mahdollisimman hyvin luonnonolosuhteita rakentamisen eri vaiheissa. Tämän vuoksi näytteitä kuormitettiin lujittumisen aikana. Kuormitusportaat valittiin siten, että ne vastasivat esikuormituspenkereiden kuormituksia (kuva 8).

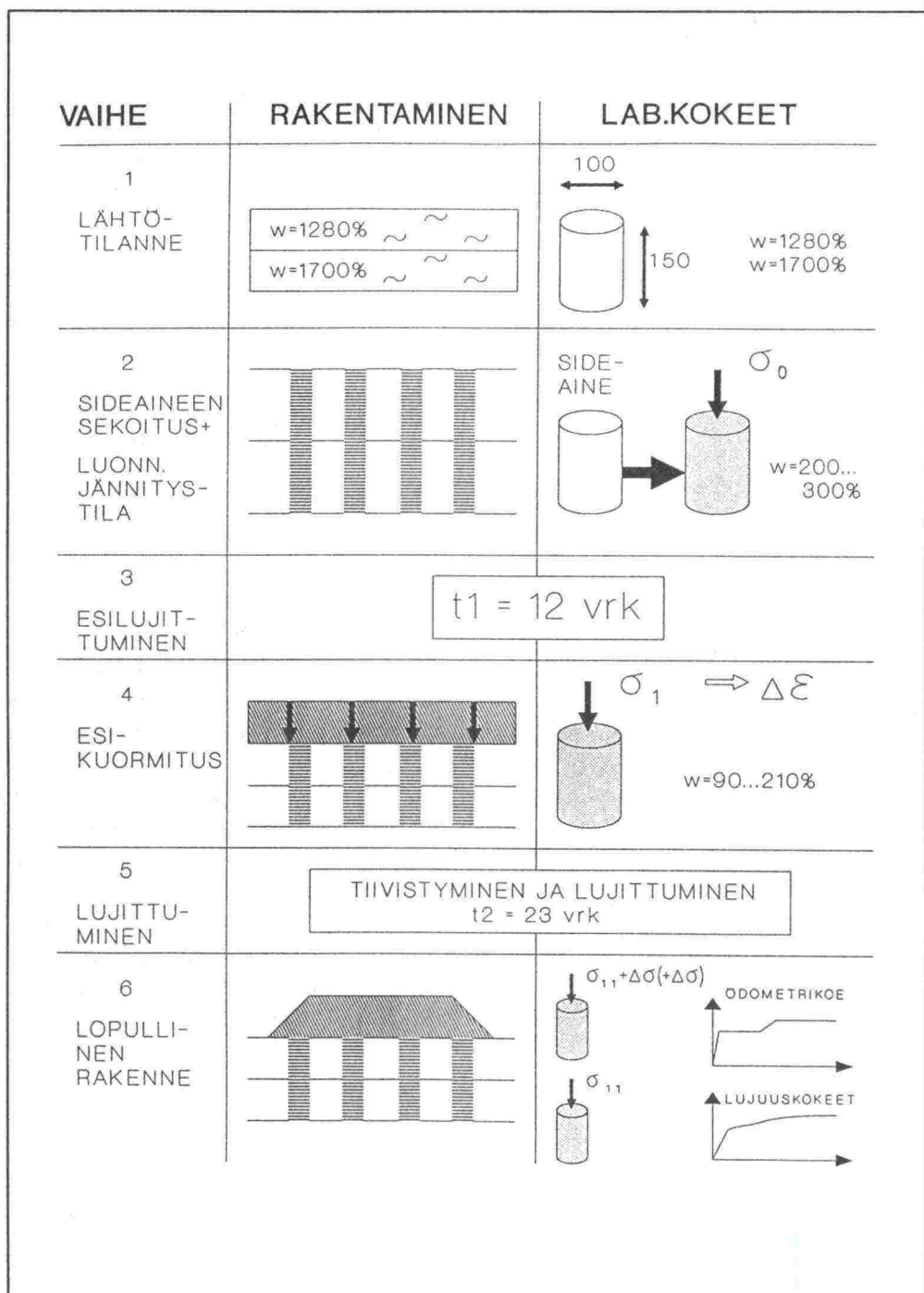
Turpeen kokoonpuristuvuus-lujuuskoetta varten stabiloitu turve sullottiin näytesylinteriin, jonka halkaisija oli 100 mm ja korkeus 200 mm. Kun massa oli sylinterissä, asetettiin sen päälle kevyt kuormitus (1 - 2 m turpeelle 12 kN/m² ja 3 - 4 m turpeelle 17 kN/m²) noin 2 viikoksi. Tänä aikana mitattiin näytteen kokoonpuristuvuutta ajan myötä. Kun näyte oli ollut tässä kuormitustilanteessa noin 2 viikkoa, kuormitusta lisättiin asteittain niin, että se vastasi lopulta turpeen päälle suunnitellun esikuormituspenkereen laskentakuormaa. Näin seurattiin lisäkuorman aiheuttamaa kokoonpuristumaa näytteessä. Kuormitusta jatkettiin noin 1,5 kk.

Yksi- ja kolmiaksisiaalisen puristuskojeen (UU-koje) turvenäytteet valmistettiin näytesylintereihin, joiden halkaisija oli 66 mm ja korkeus 150 mm. Stabiloitu turve sullottiin näytesylinteriin noin viitenä kerroksena niin ettei näytteen reunoille jäänyt koloja.

Savinäytteet valmistettiin STO-91 mukaisesti näytesylintereihin, joiden halkaisija oli 43 mm ja korkeus 120 mm.

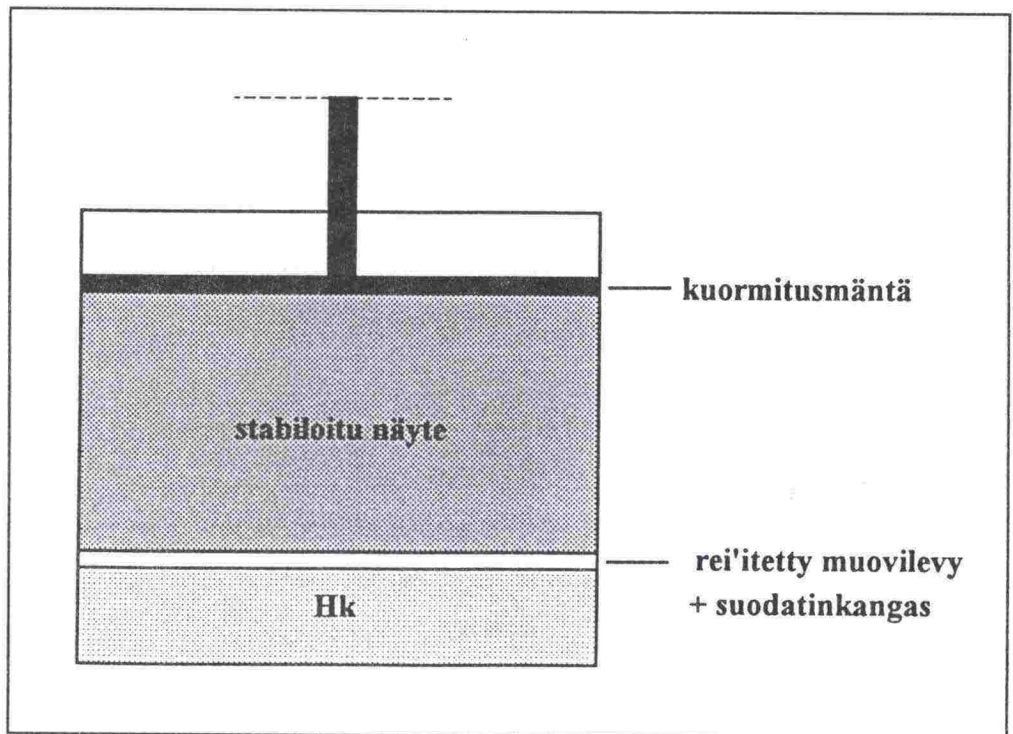
Kolmiaksisiaalisen puristuskojeen näytteet valmistettiin näytesylintereihin, joiden korkeus oli 170 mm ja halkaisija 50 mm. Stabiloitu turve sullottiin viitenä kerroksena niin, ettei näytteen reunoille jäänyt koloja. Savinäytteet valmistettiin tiivistämällä stabiloitu näyte 20 - 30 mm kerroksina. Tiivistäminen tehtiin lyömällä Proctor-vasaralla 10 iskua kerrosta kohden.

Näytteitä säilytettiin kylmähuoneessa näytetelineissä, joissa ne pääsivät esikonsolidoitumaan. Alaosasta avoimet näytesylinterit asetettiin rei'itetyn alumiinilevyn päälle, jonka alla oli vedellä kyllästetty hiekkapatja. Näytteiden ja ilman väliset kosteusvaihtelut oli eliminoitu tiivistämällä näytesylinterin ja alumiinilevyn liitoskohta silikonilla ja yläosa muovipussilla ja ilmastointiteipillä. Näytteiden päälle laitettiin aluksi kevyt kuormitus (5 kPa) 30 vrk:n ajaksi. Tämän jälkeen kuormitus nostettiin 25 kPa:iin, jota pidettiin lujuuskokeiden suorittamiseen saakka. (Ahonen 1993)



Kuva 8. Stabiloidun turpeen tutkimusmenetelmän periaate.

Rowen sellin ödometrinäytteet tehtiin teräksestä valmistettuihin sylintereihin, joiden korkeus oli 200 mm ja halkaisija 254 mm (kuva 9). Sylinterin alaosassa oli 50 mm paksu vedellä kyllästetty hiekkakerros, jonka päällä oli rei'itetty muovilevy ja suodatinkangas. Näytteet valmistettiin punnitsemalla stabiloitua



Kuva 9. Kaaviokuva näytesylinteristä.

turvemassaa tarvittava määrä ja sullomalla se näytesylinteriin siten, että saavutettiin haluttu tilavuuspaino. Näytteiden lähtökorkeudet olivat 100 - 105 mm. Kuormitusmännän ja painojen avulla näytteen päälle asetettiin kuormitus. Kuormitusportaat olivat 5-10-27 kPa ja vastaavat kuormitusajat 7-23-46 vrk (Ahonen 1993).

4.3 Tutkimuksen toteutus vaiheittain

Stabiloituvuuskokeet toteutettiin kolmessa vaiheessa (taulukko 9).

Ensimmäisessä vaiheessa selvitettiin turve- ja savikerrosten potentiaalista lujittumista useilla eri sideaineilla.

Toisessa vaiheessa selvitettiin ensimmäisen vaiheen tulosten perusteella valittujen sideaineiden optimimäärä ja ajan vaikutus lujittumiseen.

Kolmannessa vaiheessa määritettiin toisen vaiheen parhailla sideaineilla ja optimimäärällä stabiloitujen näytteiden lujuus- ja kookoonpuristuvuusominaisuudet. Tutkimukset tehtiin diplomityönä Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriossa. Tutkimuksen tarkoitus oli saada mahdollisimman luotettavat mitoitusparametrit lopullisia painuma- ja stabiiliteetilaskelmia varten.

Taulukko 9. Vaiheittain stabiloitujen turve- ja savinäytteiden sideaineet, näytteenottokerrokset ja koestusmenetelmät.

Tutkimusvaihe/ Sideaine/seossuhde	Maalaji / syvyys (m)				
	Turve		Savi		
	1 - 2	3 - 4	5,5 - 6,5	11 -12	17,5-18,5
<u>I-vaihe</u>					
F + CaO / 1:1	x	x	x	x	x
YSe + CaO / 1:1	x	x	x	x	x
YSe	x	x	x	x	
PSe + CaO / 1:1	x	x		x	
PSe	x	x	x	x	
Lohjan seos 2	x	x		x	x
Rikkikipsi + Se / 1:1	x	x		x	x
PSe + lentotuhka / 1:1	x	x			
PSe + Maku /1:1	x	x			
<u>II-vaihe</u>					
F + CaO / 1:1	x	x	x ♦	x ♦	x ♦
YSe + CaO / 2:1	x ■	x ■	x ♦	x ♦	x ♦
2) YSe	x ■	x ■	x ♦	x ♦	x ♦
PSe + CaO / 2:1	x ■	x ■	x ♦	x ♦	x ♦
2) PSe			x ♦	x ♦	x ♦
PSe + Maku / 1:1	x ■	x ■			
F + PSe / 1:1	x ■	x ■			
F + YSe / 1:1	x ■	x ■		x	
1) YSe + Rki (1:1)				x ♦	
1) Vki + CaO (1:1)				x ♦	
<u>III-vaihe</u>					
F + PSe / 1:1	Δ * ♦	Δ * ♦			
F + CaO / 1:1				♦	
PSe + Maku / 1:1	Δ * ♦	Δ * ♦			
PSe + CaO / 1:1				♦	
1) Sivutuotteiden hyötykäytön testaus					
2) Ns. lujien pilareiden mahdollisuuksien tutkiminen					
x =1-aksiaalikoe ♦ = 3-aksiaalikoe ■ = kokoonpuristuvuus-lujuuskoe Δ = Ödometrikoe Rowen sellillä * = vedenpidätyskäyrä					

4.4 Stabilointitutkimusten tulokset

4.4.1 Stabiloidun turpeen ominaisuudet

4.4.1.1 Turpeen stabiloituvuus

I-vaiheen tutkimustulokset

Laboratoriotutkimusten tavoitteena oli selvittää I-vaiheessa sideaineet ja sideainemäärät, joilla turvekerrokset lujittuisivat hyvin ja kokoonpuristuminen tapahtuisi mahdollisimman nopeasti. Tavoitelujuudeksi asetettiin noin 50 kPa, jolloin stabiloitu turvekerros toimisi lähes painumattomana kuivakuorimaisena kerroksena syvästabiloidun saven päällä. Koekappaleet valmistettiin kohdan 4.2.3 mukaisesti ja koestettiin yksiaksiaalisella puristuskojeella 30 vrk:n lujittumisen jälkeen. Sideaineina käytettiin taulukon 10 mukaisia sideaineita ja sideaineseoksia; sideainemäärät olivat 250 kg/m³ ja 500 kg/m³.

Taulukko 10. Turvekerrosten stabiloinnissa käytetyt sideaineet ja sideainemäärät (kg/m³) I-tutkimusvaiheessa.

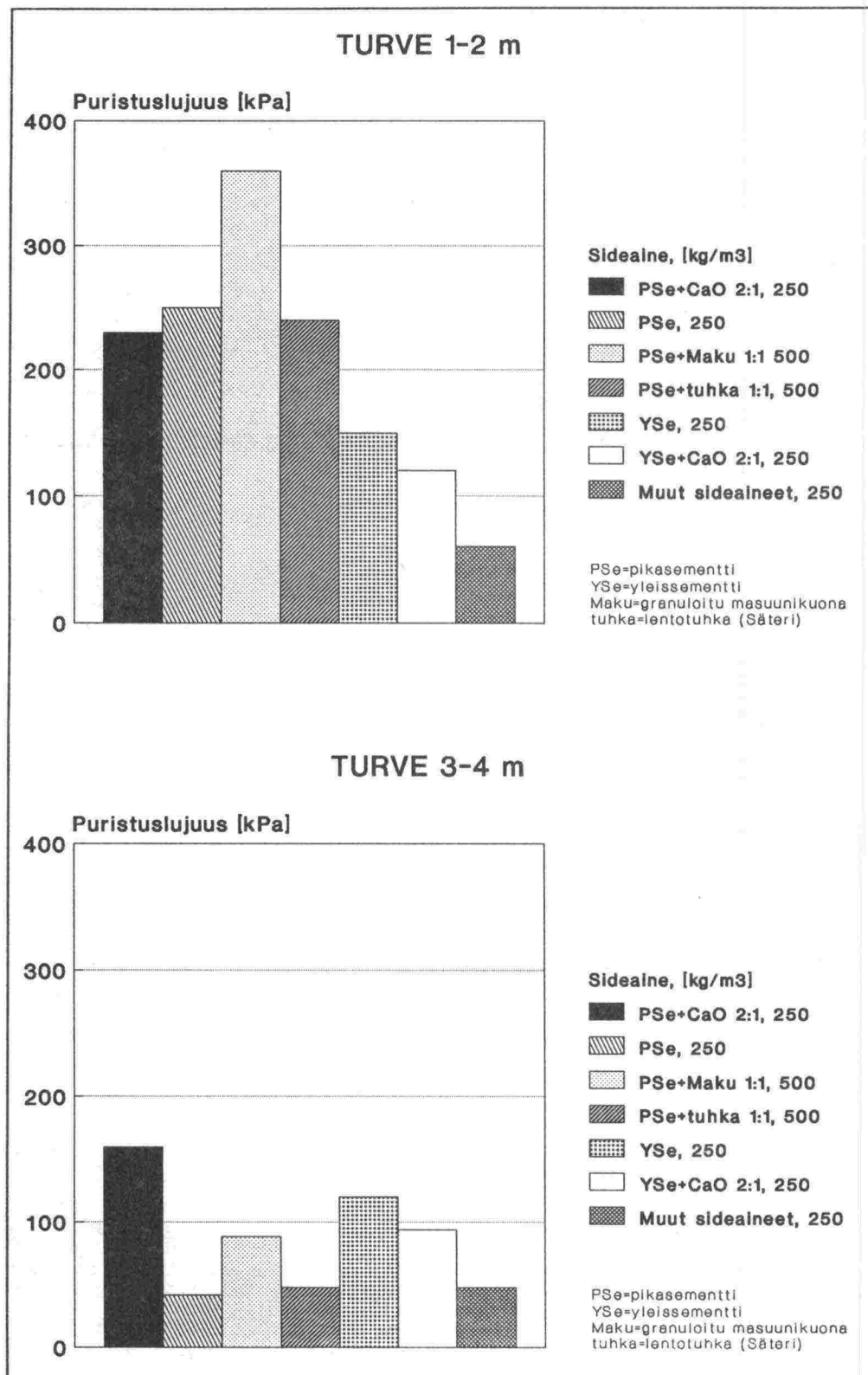
Sideaine	Turvekerros	
	1...2 m	3...4 m
PSe + CaO 2:1	250	250
PSe	250	250
PSe + Maku 1:1	500	500
PSe + lentotuhka 1:1	500	500
YSe	250	250
YSe + CaO 2:1	250	250
Muut	250	250

Ylemmässä turvekerroksessa (syv. 1-2m) parhaiten lujittavia sideaineita olivat pikasementtipohjaiset sideaineet (kuva 10). Suurin leikkauslujuus saavutettiin pikasementti + masuunikuona -seoksella ($\tau = 175$ kPa). Myös muilla pikasementtipohjaisilla sideaineilla saavutettiin > 100 kPa leikkauslujuus. Yleisementillä ja -seoksilla leikkauslujuus oli huomattavasti pienempi. Alempi turvekerros (syv. 3-4m) lujittui parhaiten pikasementti+CaO-seoksella; leikkauslujuus oli tällöin $\tau = 85$ kPa. Muilla pikasementtipohjaisilla sideaineilla lujuudet jäivät tässä kerroksessa huomattavasti pienemmiksi ylempään kerrokseen verrattuna. Yleisementillä ja sen seoksilla vastaava ero oli pienempi.

Useimmilla kipsiä sisältävillä sideaineseoksilla (Lohjan seos, Finnstabi+CaO ja rikkikipsi + yleisementti) leikkauslujuus jäi pieneksi (noin 25 kPa). Myöskään poltetu kalkki sideaineseoksessa ei aiheuttanut riittävästi lujuutta lisäävää kuivattavaa vaikutusta.

Koestusten jälkeen näytteiden vesipitoisuudet vaihtelivat sideaineseoksen ja sideainemäärän mukaan seuraavasti:

$w < 200 \%$ 500 kg/m³ sideainemäärällä stabiloidut näytteet
 $w \approx 200-250 \%$ sementtiä sisältävät näytteet
 $w \approx 300 \%$ kipsimäisillä sideaineilla stabiloidut näytteet



Kuva 10. Stabiloitujen turvekerrosten lujuus 30 vrk:n lujittumisen jälkeen.

Koetulosten hajonta rinnakkaisnäytteissä oli melko suurta, mikä johtui näytteiden epähomogeenisesta rakenteesta. Hajonta oli suurta etenkin vesipitoisissa ja pehmeissä näytteissä.

Esikonsolidoitujen näytteiden lujittuminen

Kokoonpuristuminen esikonsolidoitumisen aikana

Esikonsolidoinnin tavoitteena oli tiivistää stabiloitu turvenäyte lujittumisprosessin aikana ennen varsinaista lujuuskoetta. Esikonsolidointi suoritettiin molemmille turvekerroksille seuraavilla sideaineilla:

Finnstabi + CaO	1:1	250 kg/m ³
PSe + CaO	2:1	250 kg/m ³
YSe + CaO	2:1	250 kg/m ³

Kuormitus lisättiin välittömästi sideaineen sekoittamisen jälkeen. Kuormitus vaihteli 7 kN/m² - 60 kN/m² ja kunkin kuormitusvaiheen kesto oli noin 2 viikkoa. Näytteet koestettiin yksiaksiaalisella puristuskojeella noin 1.5 kk kestäneen konsolidoinnin jälkeen.

Pikaseementti+CaO-seoksella ja yleisseementti+CaO-seoksella stabiloitujen näytteiden kokoonpuristuminen tapahtui nopeasti kuormituksen lisäämisen jälkeen eikä ajasta riippuvaa virumista ollut havaittavissa (kuva 11). Finnstabi+CaO-seoksella stabiloitujen näytteiden tiivistyminen tapahtui muita selvästi hitaammin. Kokonaispainumat ylemmässä turvekerroksessa olivat noin 10-15 % ja vastaavasti alemmassa kerroksessa noin 18-30 % näytteen alkuperäisestä korkeudesta. Suurimmat painumat saatiin Finnstabi+CaO-seoksella stabiloiduilla näytteillä.

Esikonsolidoitujen näytteiden lujuus

Esikonsolidoinnin jälkeen koestetuissa näytteissä suurin leikkauslujuus saavutettiin ylemmässä turvekerroksessa pikaseementti+CaO -seoksella ($\tau = 380$ kPa) ja vastaavasti alemmassa turvekerroksessa yleisseementti+CaO-seoksella ($\tau = 210$ kPa) (kuva 12). Finnstabi+CaO-seoksella leikkauslujuus jäi pienimmäksi molemmissa kerroksissa ($\tau = 100$ kPa).

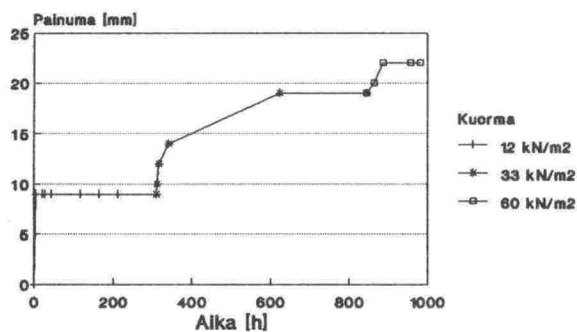
4.4.1.2 Stabiloitun turpeen lujuuteen vaikuttavat tekijät

II-tutkimusvaihe

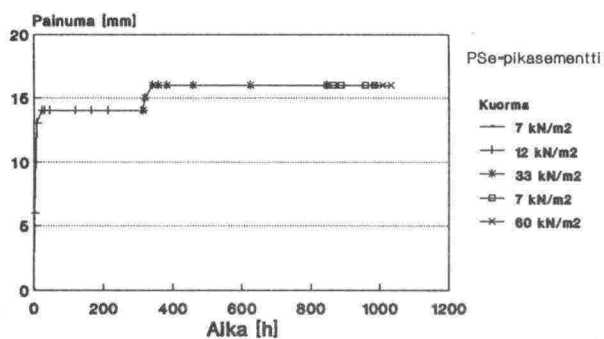
Sideainemäärän vaikutus stabiloitun turpeen lujuuteen

Toisen tutkimusvaiheen tavoitteena oli selvittää sideainemäärän ja ajan vaikutus I-vaiheen tulosten mukaisesti parhaimmille sideaineseoksille sekä Finnstabi+CaO ja Finnstabi+pikaseementti -seoksille (taulukko 11). Sideainemäärän vaikutuksia turpeen lujittumiseen tutkittiin vaihtelemalla sideainemääriä 100-300 kg/m³. Koestusajankohdiksi valittiin 30-80-180-360 vrk.

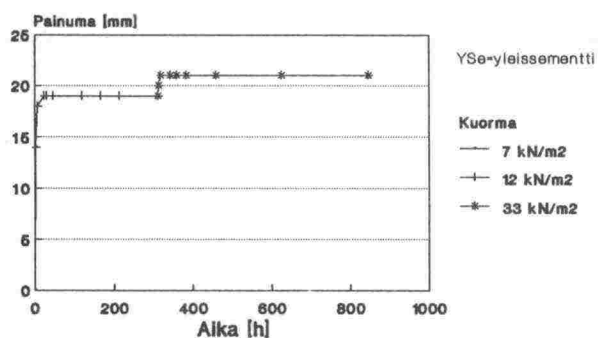
TURVE 1-2 m, Finnstabi+CaO 1:1 250 kg/m³
Näytteen lähtökorkeus h₀ = 150 mm



TURVE 1-2 m, PSe+CaO 2:1 250 kg/m³
Näytteen lähtökorkeus h₀ = 150 mm

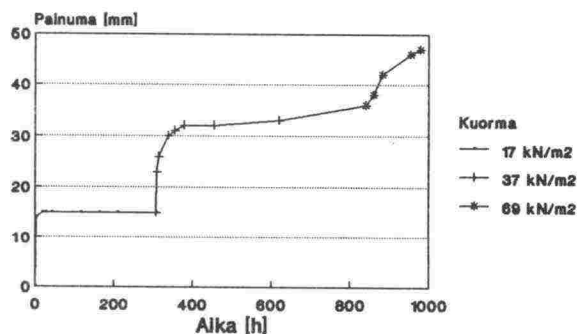


TURVE 1-2 m, YSe+CaO 2:1 250 kg/m³
Näytteen lähtökorkeus h₀ = 150 mm

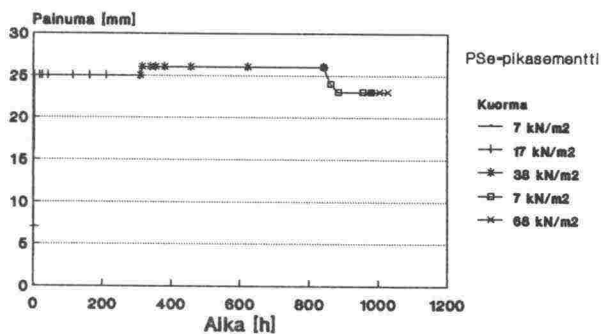


Kuva 11.a) Stabiloitujen turvenäytteiden kokoonpuristuminen lujittumisen aikana, syvyys 1-2 m

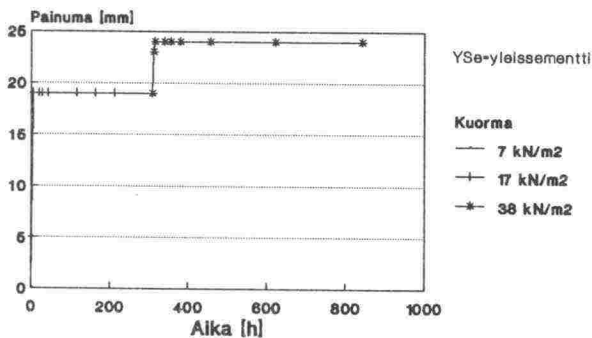
TURVE 3-4 m, Finnstabi+CaO 1:1 250 kg/m³
Näytteen lähtökorkeus h₀ = 150 mm



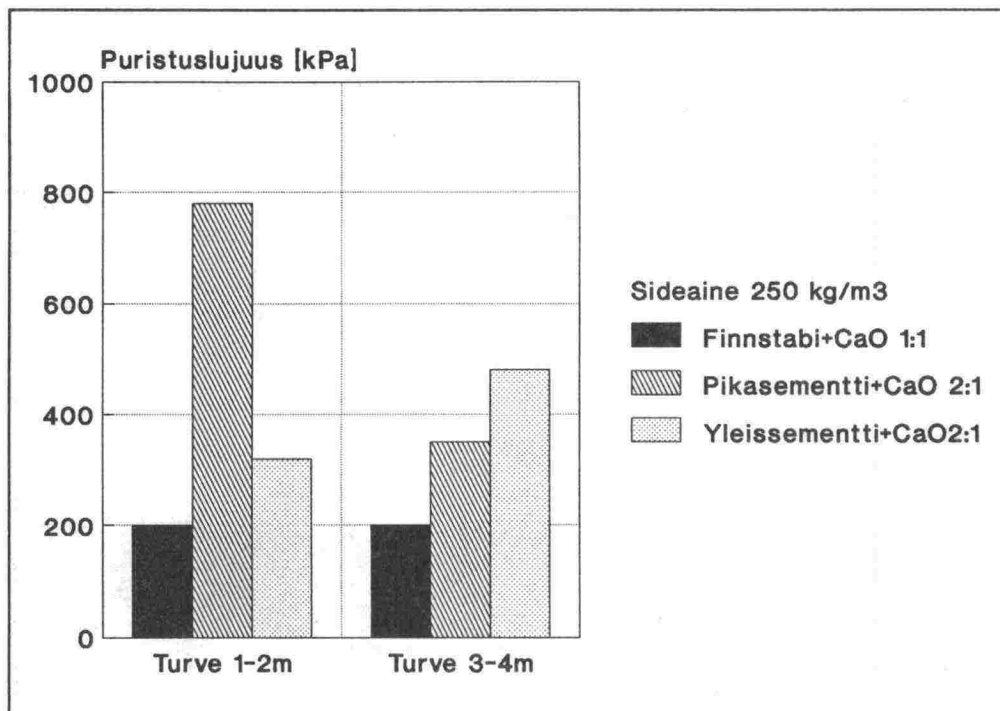
TURVE 3-4 m, PSe+CaO 2:1 250 kg/m³
Näytteen lähtökorkeus h₀ = 150 mm



TURVE 3-4 m, YSe+CaO 2:1 250 kg/m³
Näytteen lähtökorkeus h₀ = 150 mm



Kuva 11.b) Stabiloitujen turvenäytteiden kokoonpuristuminen lujittumisen aikana, syvyys 3-4 m



Kuva 12. Esikonsolidoinnin jälkeen koestettujen stabiloitujen turvenäytteiden leikkauslujuus.

Taulukko 11. Turvekerrosten stabiloinnissa käytetyt sideaineet, sideainemäärät ja koestusajankohdat II-tutkimusvaiheessa.

Piennäytteet	Koestusaika ja sideaineseoksia vastaavat sideainemäärät (kg/m ³)			
	30 vrk	80 vrk	180 vrk	360 vrk
PSe+CaO 2:1	200	100, 150, 200	200	200
PSe+Maku 1:1	-	100, 200, 300	300	-
YSe	-	100, 150, 200	200	-
YSe+CaO 2:1	200	100, 150, 200	200	200
F+CaO 2:1	250	150, 200, 250	250	250
F+PSe 1:1	250	250	-	-

F on Finnstabi

YSe yleissementti

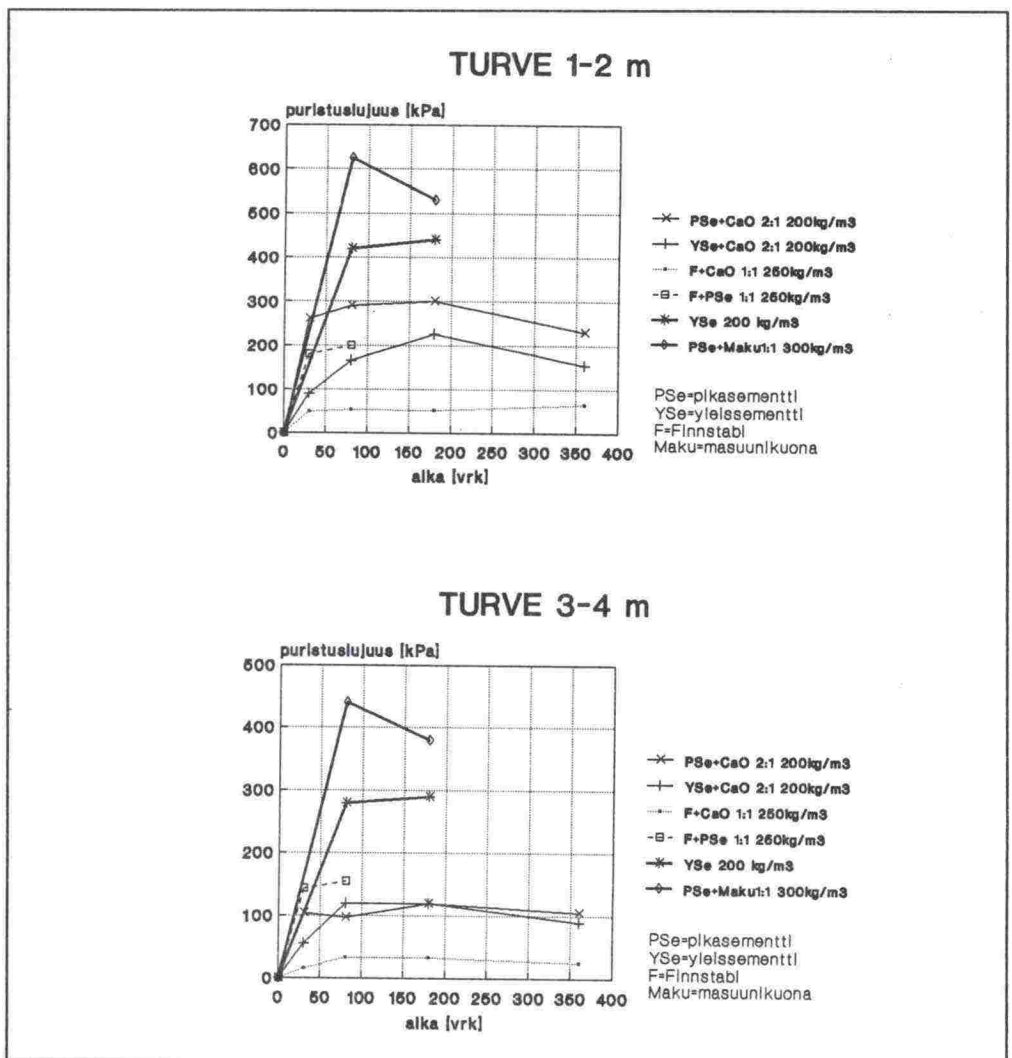
PSe pikasementti

Maku granuloitu ja jauhamaton masuunikuona

Lujittumisnopeus

Leikkauslujuus kasvoi kaikilla sideaineilla 80 vrk:een saakka, jolloin saavutettiin loppulujuus molemmissa turvekerroksissa (kuva 13). Parhaiten lujittavia sideaineita molemmissa kerroksissa olivat pikasementti+masuunikuona-seos ja yleissementti. Maksimileikkauslujuus oli tällöin 150 - 300 kPa. Ylemmän turvekerroksen lujuus on kaikilla sideaineilla selvästi parempi kuin alemmassa kerroksessa. Molemmissa kerroksissa selvästi heikommin lujittava sideaine oli Finnstabi+CaO-seos, jolla leikkauslujuus vaihteli 15-25 kPa.

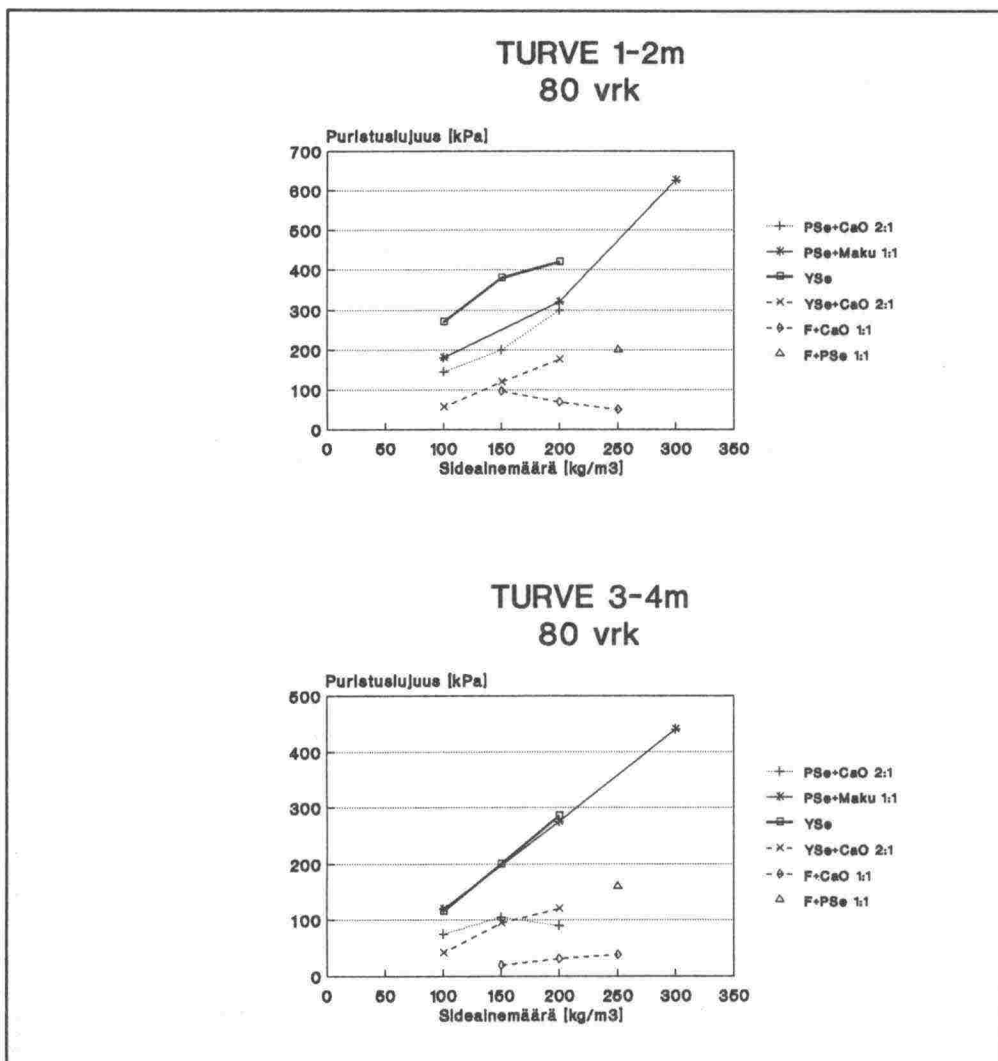
Lähes kaikilla hyvin lujittavilla sideaineilla pitkäaikaislujuus oli hieman pienempi 80 vrk:n lujuuteen verrattuna. Lujuustaso säilyy kuitenkin vielä vuoden ikäisissä näytteissä.



Kuva 13. Ajan vaikutus stabiloitujen turvenäytteiden lujuuteen.

Sideainemäärän optimointi

Hyvin lujittavilla sideaineilla leikkauslujuus kasvoi sideainemäärän funktiona (kuva 14). Voimakkain lujittumisnopeus oli pikasementti+masuunikuona-seoksella, jolla leikkauslujuus kasvoi kolminkertaisesti sideainemäärän kasvaessa 100 kg/m^3 - 300 kg/m^3 . Lujuuden lisäys oli lähes lineaarista. Heikosti lujittavilla sideaineseoksilla ei sideainemäärää kasvattamalla saatu merkittävää lisälujittumista.



Kuva 14. Sideainemäärän vaikutus stabiloidun turpeen lujuuteen II-tutkimusvaiheessa.

Esikonsolidoitujen näytteiden lujittuminen

Kokoonpuristuminen esikonsolidoitumisen aikana

Lujittumisprosessin aikana esikonsolidoitiin molemmat turvekerrokset seuraavilla sideaineseoksilla ja sideainemäärillä:

1.	Pikaseementti+CaO	2:1	200 kg/m ³
2.	Yleisseementti+CaO	2:1	200 kg/m ³
3.	Finnstabi+pikaseementti	2:1	250 kg/m ³
4.	Yleisseementti		200 kg/m ³
5.	Pikaseementti+masuunikuona	1:1	300 kg/m ³
6.	Pikaseementti+CaO	2:1	100 kg/m ³

Näytteet valmistettiin I-tutkimusvaiheen tavoin. Kuormitusportaot valittiin vastaamaan Veittostensuon koekentän eri kuormitusvaiheita. Konsolidoinnin kesto oli noin 3 kk, minkä jälkeen näytteet koestettiin yksiaksiaalisella puristuskokeella.

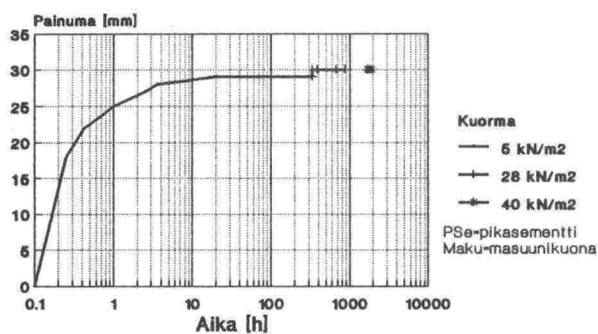
Painuminen tapahtui kaikilla sideaineseoksilla nopeasti kuormituksen lisäyksen jälkeen (kuva 15 ja 16). Suurin osa painumista tapahtui ensimmäisten 11 tunnin kuluessa. Poikkeuksena pikaseementti+CaO-seoksella ja sideainemäärällä 100 kg/m³ stabiloidut näytteet, joissa painuminen jatkui vielä 300 tunnin kuluttua kuormituksen lisäämisen jälkeen.

Esikonsolidoitujen näytteiden lujuus

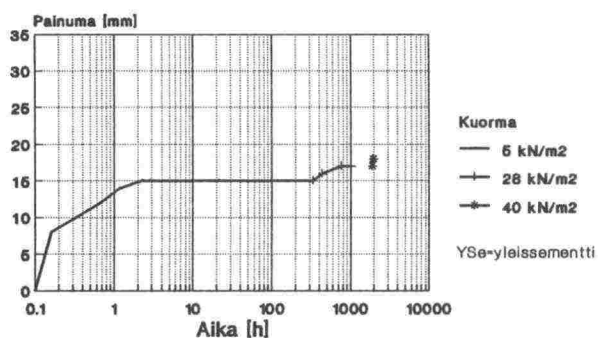
Esikonsolidoinnin jälkeen näytteet koestettiin yksiaksiaalisella puristuskokeella noin 3 kk ikäisenä. Parhaimmat leikkauslujuudet saatiin molemmissa kerroksissa pikaseementti+masuunikuona-seoksella sekä Finnstabi+pikaseementti-seoksella (kuva 17). Pikaseementti+masuunikuona-seoksella leikkauslujuus oli ylemmässä kerroksessa $\tau = 500$ kPa ja alemmassa kerroksessa $\tau = 235$ kPa. Ylemmässä kerroksessa pikaseementti+masuunikuona-seoksella ja Finnstabi+pikaseementti-seoksella stabiloitaessa lujuus on lähes kaksinkertainen alemmaan kerrokseen verrattuna. Muilla tutkituilla sideaineilla alemmassa kerroksessa saatiin hieman parempi lujittuminen.

Yhteenvetona turpeen stabiloitavuuskokeista voidaan todeta, että tavoitteeksi asetettu lujuustaso voidaan saada aikaan useilla sideaineyhdistelmillä ja sideainepitoisuuksilla. Lujuuskokeissa parhaimmiksi sideaineyhdistelmiksi osoittautuivat Finnstabi+pikaseementti sekä pikaseementti+masuunikuona-seokset. Koerakentamista varten turpeen stabilointiin valittiin em. seokset, koska stabiloitujen näytteiden painumat jäivät näillä seoksilla muita pienimmiksi.

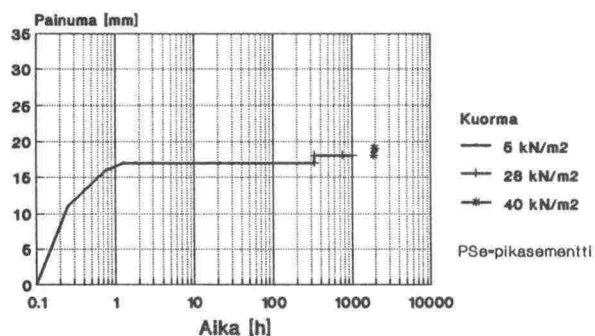
TURVE 1-2 m, PSe+Maku 1:1 300 kg/m³
Näytteen lähtökorkeus h₀ = 171 mm



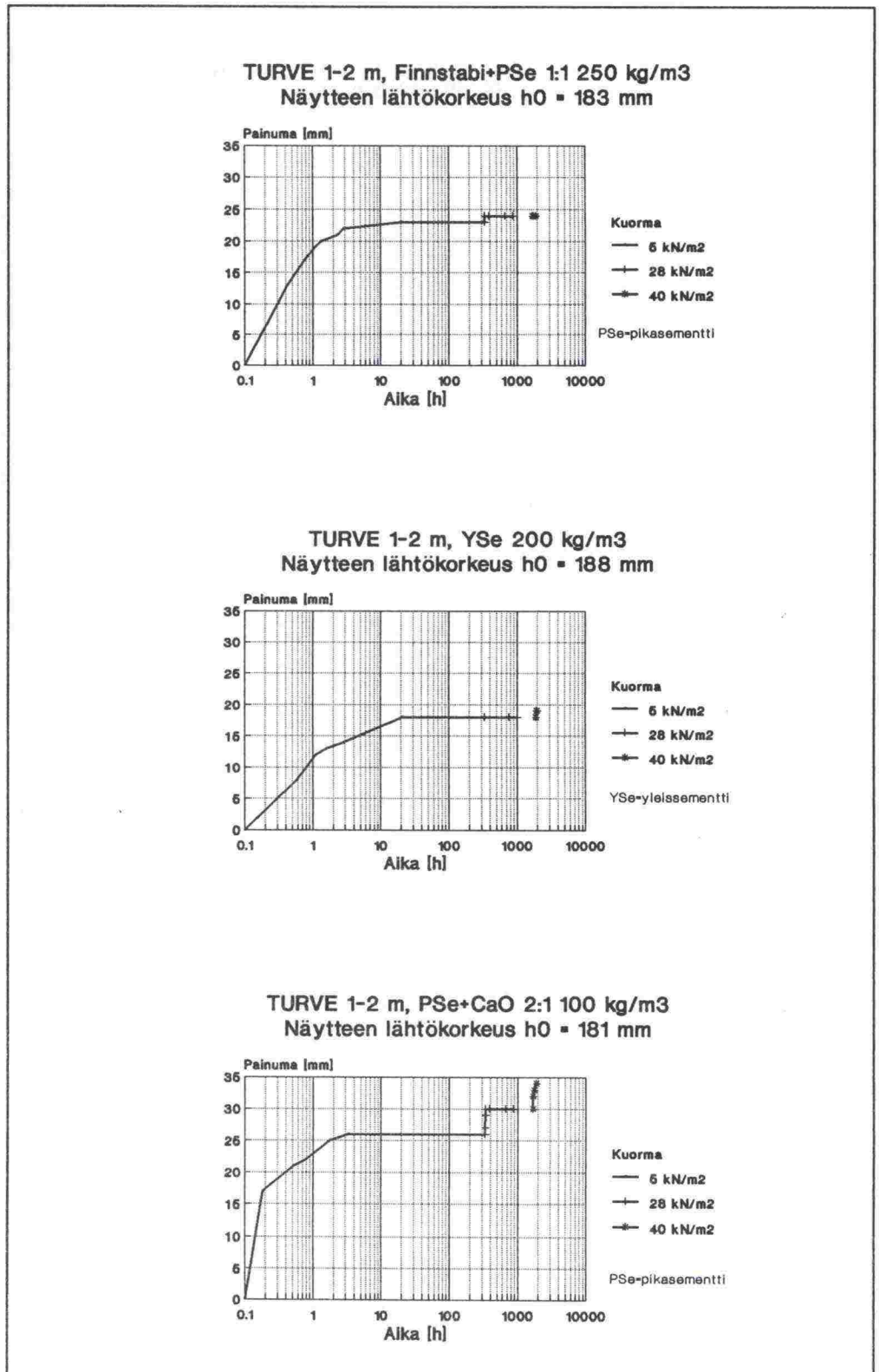
TURVE 1-2 m, YSe+CaO 2:1 200 kg/m³
Näytteen lähtökorkeus h₀ = 189 mm



TURVE 1-2 m, PSe+CaO 2:1 200 kg/m³
Näytteen lähtökorkeus h₀ = 182 mm

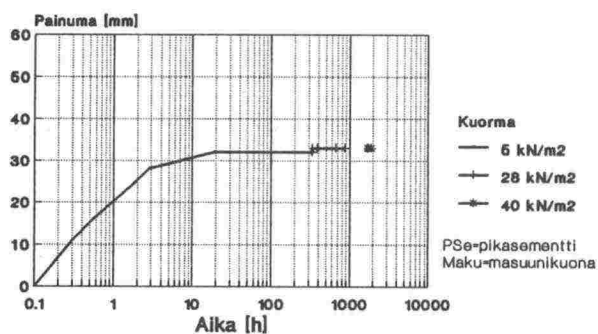


Kuva 15. a) Stabiloitujen turvenäytteiden (syv. 1-2 m) kokoonpuristuminen lujittumisen aikana II-tutkimusvaiheessa.

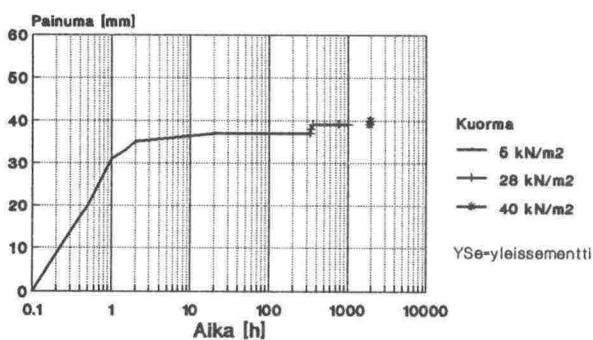


Kuva 15. b) Stabiloitujen turvenäytteiden (syv. 1-2 m) kokoonpuristuminen lujittumisen aikana II-tutkimusvaiheessa.

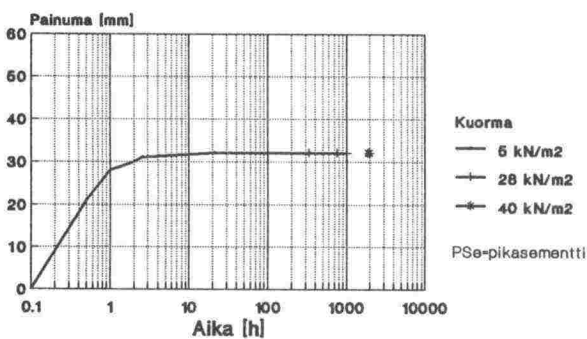
TURVE 3-4 m, PSe+Maku 1:1 300 kg/m³
Näytteen lähtökorkeus h₀ = 186 mm



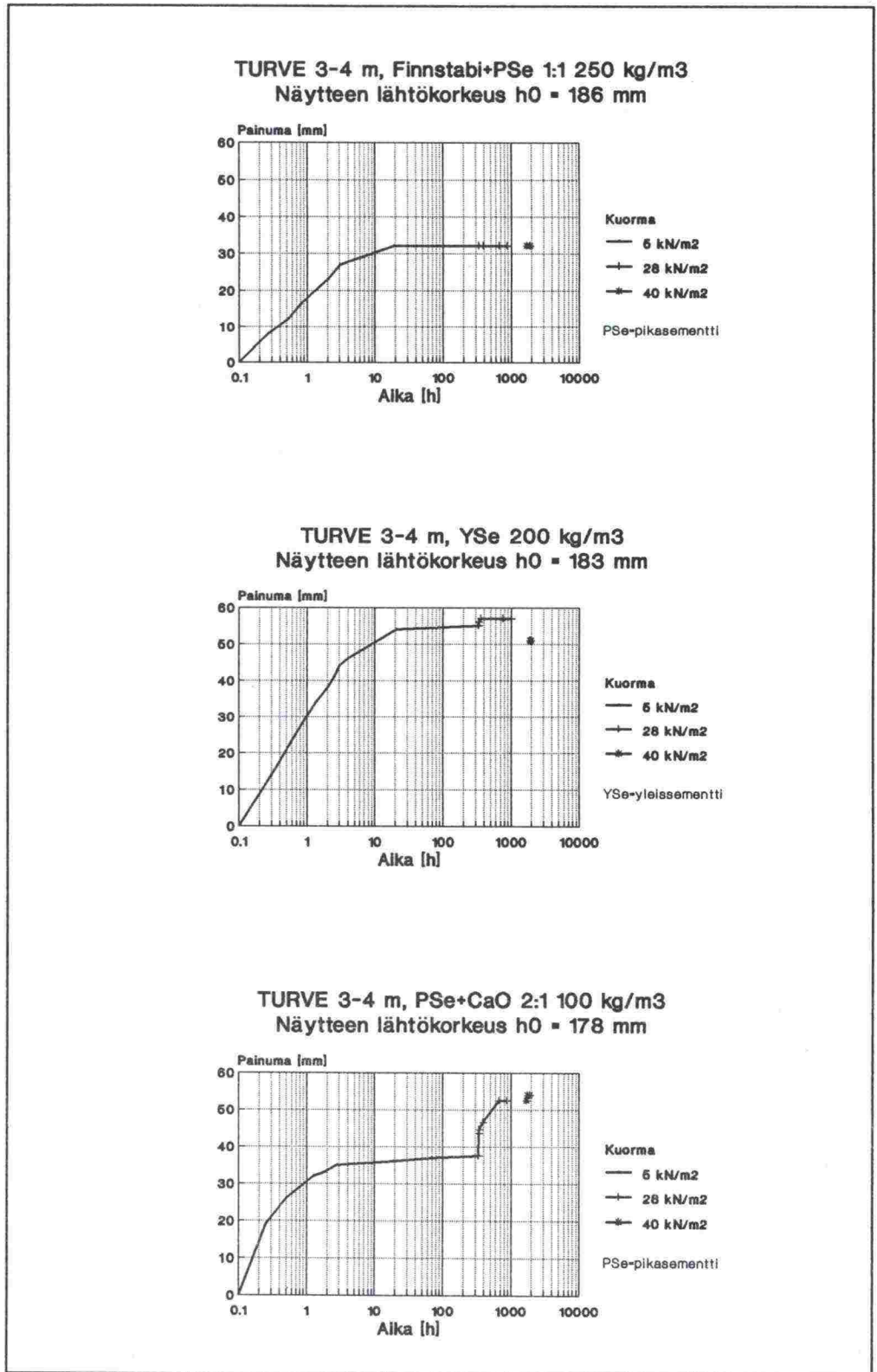
TURVE 3-4 m, YSe+CaO 2:1 200 kg/m³
Näytteen lähtökorkeus h₀ = 192 mm



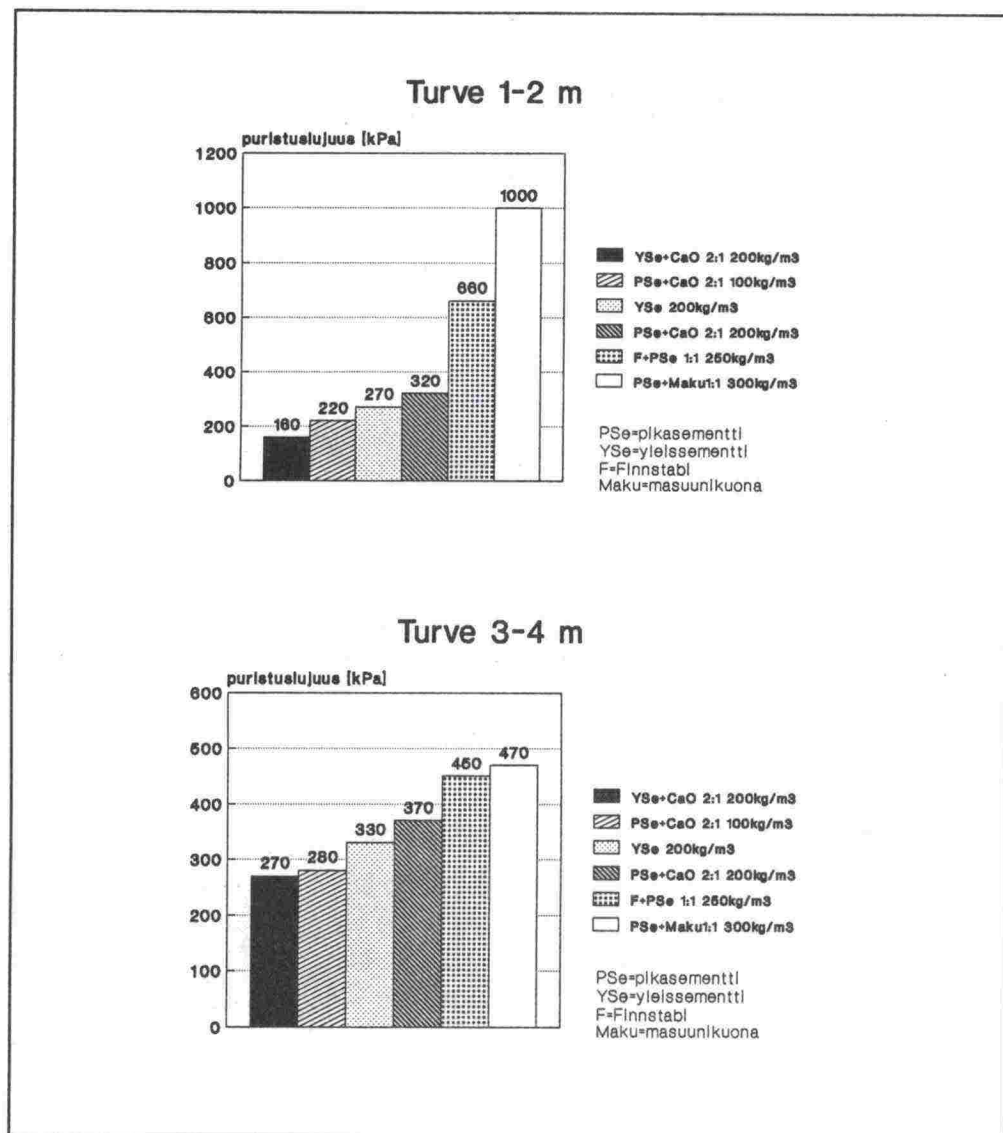
TURVE 3-4 m, PSe+CaO 2:1 200 kg/m³
Näytteen lähtökorkeus h₀ = 185 mm



Kuva 16. a) Stabiloitujen turvenäytteiden (syv. 3-4 m) kokoonpuristuminen lujittumisen aikana II-tutkimusvaiheessa.



Kuva 16. b) Stabiloitujen turvenäytteiden (syv. 3-4 m) kokoonpuristuminen lujittumisen aikana II-tutkimusvaiheessa.



Kuva 17. Kokoonpuristuvuuskokeissa olleiden näytteiden lujuustulokset.

4.4.1.3 Stabiloidun turpeen mitoitusparametrit

III-tutkimusvaihe

Stabiloidun turpeen lujuusparametrit

Kolmannen vaiheen tutkimusten tavoitteena oli määrittää koerakenteeseen valituilla sideaineilla stabiloitujen turpeiden yksityiskohtaiset lujuus- ja muodonmuutosparametrit koerakenteen lopullista mitoitusta varten. Sideaineina käytettiin molemmissa turvekerroksissa Finnstabi+pikasementti 1:1 250 kg/m³ ja pikasementti+masuunikuona 1:1 300 kg/m³ sideaineita. Näytteet koestettiin 2,5 kk:n lujittumisen jälkeen.

Stabiloitu turve käyttäytyy kuormitettaessa myötölujittuvan materiaalin tavoin. Jännitys-muodonmuutossuhdetta voidaan approksimoida pienillä muodonmuutosten arvoilla hyperbelifunktion avulla. Hyperbelifunktion parametrien avulla voidaan puolestaan määrittää initiaalikimmomoduuli ja puristuslujuus (taulukko 12).

Taulukko 12. Stabiloidun turpeen jännitys-muodonmuutossuhdetta kuvaavat hyperbelifunktion avulla lasketut kimmomoduulin ja puristuslujuuden arvot.

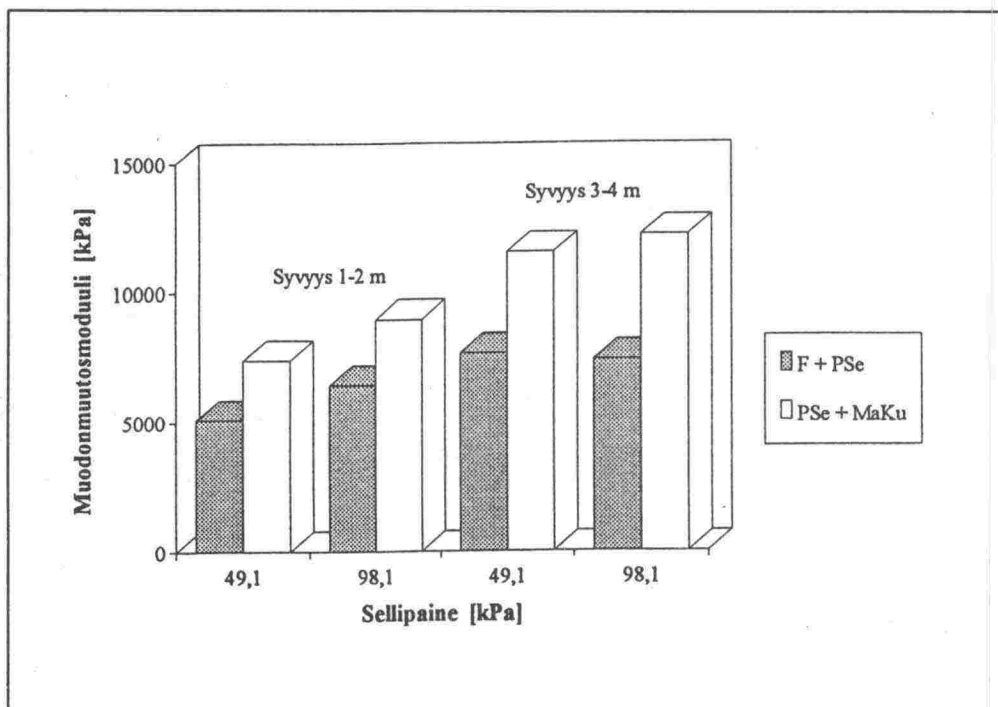
Syvyys (m)	Sideaine	σ_3 (kPa)	E_i (kPa)	q_n (kPa)
1-2	F + PSe 1:1, 250 kg/m ³	24,5	6680	260
		49,1	6370	324
		98,1	7640	366
1-2	PSe + MaKu 1:1, 300 kg/m ³	24,5	9830	316
		49,1	10040	339
		98,1	9160	644
3-4	F + PSe 1:1, 250 kg/m ³	24,5	11890	268
		49,1	10410	310
		73,6	9740	353
		98,1	9720	387
3-4	PSe + MaKu 1:1, 300 kg/m ³	24,5	19620	357
		49,1	13850	387
		73,6	13260	436
		98,1	16000	448

Tehokkaat leikkauslujuusparametrit määritettiin jännityspolkujen avulla 1.5 % ja 15 % muodonmuutoksilla. Pikasementti+masuunikuona -seoksella saatiin molemmissa kerroksissa hieman suuremmat lujuusparametrien arvot verrattuna Finnstabi+pikasementti-seokseen (taulukko 13). Pikasementti+masuunikuona -seoksella stabiloitaessa kitkakulma vaihteli 21.8 - 34.8° ja koheesio 53.9 - 100.3 kPa ja vastaavasti Finnstabi+pikasementti -seoksella kitkakulma 22.3 - 23.3° ja koheesio 59.9 - 73.8 kPa määritettynä 15 % muodonmuutosta vastaavalta jännitystasolta. Ylemmässä kerroksessa (syv. 1 - 2 m) kitkakulman arvot olivat hieman suurempia alempaan kerrokseen verrattuna. Alemmassa kerroksessa (syv. 3 - 4 m) koheesio oli puolestaan hieman suurempi kuin ylemmässä kerroksessa.

Avoimen tilan muodonmuutosmoduulit E määritettiin jännitys-muodonmuutoskäyrän alkuosalta ($\epsilon = 1.5\%$). Valittua muodonmuutosta vastaava jännitystaso edustaa koerakenteessa toteutuvia jännityksiä. Suurimmat moduuliarvot saavutettiin molemmissa kerroksissa pikasementti+masuunikuona -seoksella ja olivat noin 1.5-kertaiset Finnstabi+pikasementti -seokseen verrattuna (kuva 18). Ylemmässä kerroksessa moduuliarvot olivat hieman pienempiä kuin alemmassa kerroksessa.

Taulukko 13. Stabiloidun turpeen lujuusparametrit.

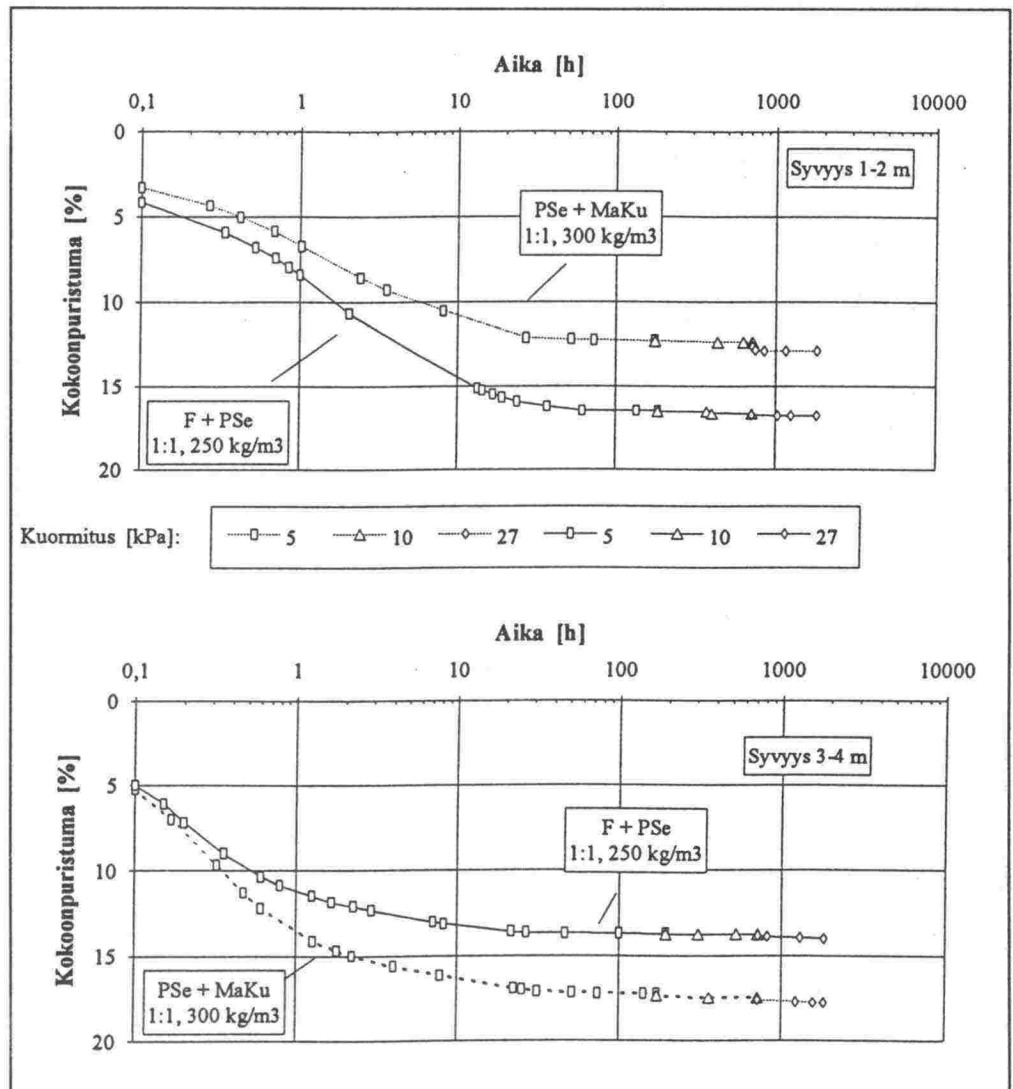
Syvyys (m)	Sideaine	Muodonmuutos (%)	c' (kPa)	ϕ' (ast.)
1-2	F + PSe 1:1, 250 kg/m ³	1,5	30,7	7,5
		15	59,9	23,3
1-2	PSe + Maku 1:1, 300 kg/m ³	1,5	40,8	10,4
		15	53,9	34,8
3-4	F + PSe 1:1, 250 kg/m ³	1,5	51,6	4,7
		15	73,8	22,3
3-4	PSe + Maku 1:1, 300 kg/m ³	1,5	62,9	10,8
		15	100,3	21,8



Kuva 18. Stabiloidun turpeen avoimen tilan muodonmuutosmoduulit.

Stabiloidun turpeen kokoonpuristuvuus

Stabiloidun turpeen kokoonpuristuvuusominaisuuksia tutkittiin välittömästi sideaineen sekoittamisen jälkeen. Seurantaa jatkettiin 2,5 kk ajan. Kokoonpuristumasta tapahtui suurin osa heti kuormituksen lisäyksen jälkeen ennen varsinaisten lujuttumisreaktioiden alkamista. Ensimmäisen kymmenen tunnin aikana kokoonpuristumasta tapahtui noin 90 % (kuva 19). Turvekerrosten aikapainumavuorosuhde oli lähes samanlainen molemmissa kerroksissa. Kokonaispainuma oli ylemmässä kerroksessa pikasementti+masuunikuona-seoksella stabiloitaessa hieman pienempi kuin Finnstabi+pikasementti

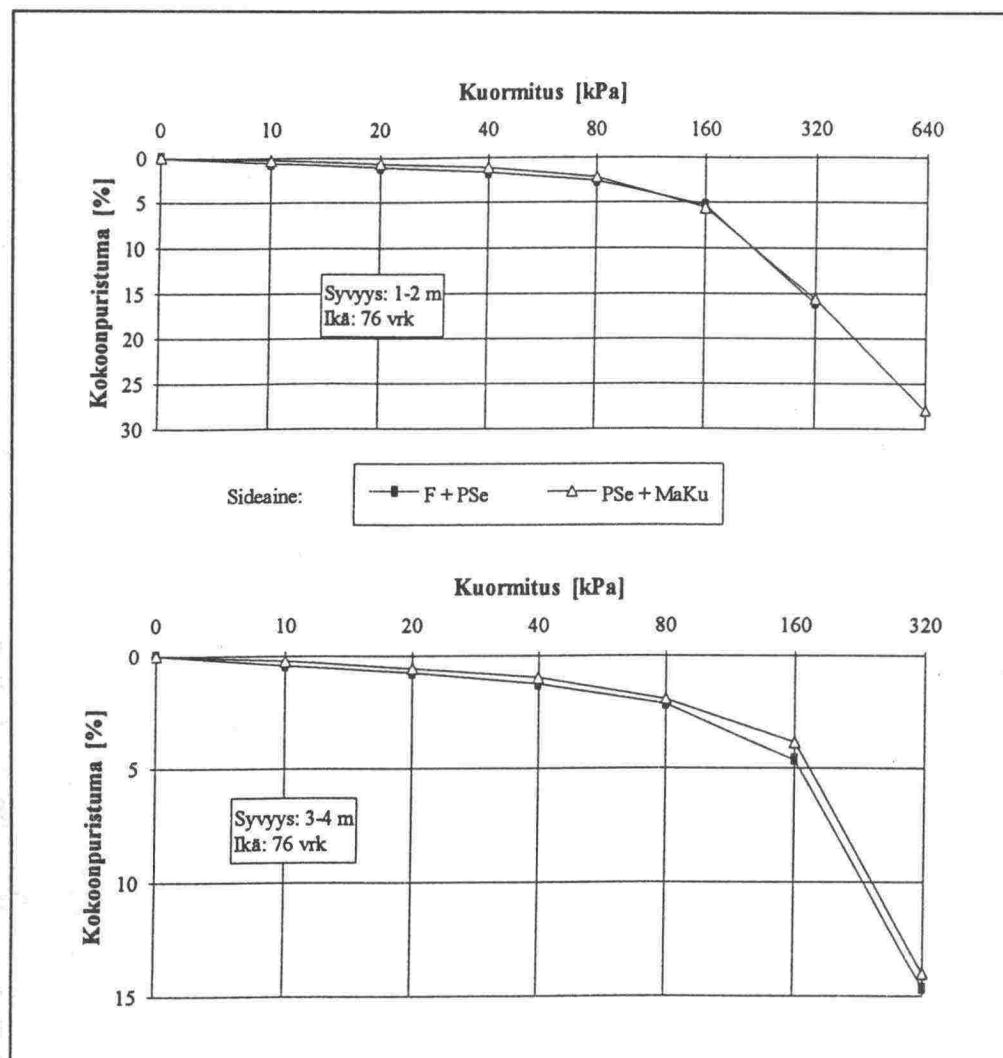


Kuva 19. Stabiloitujen turvekerrosten aika-kokoonpuristumakuvaajat.

-seoksella. Alemmassa kerroksessa vastaavasti Finnstabi+pikasementti-seoksella saatiin hieman pienempi kokoonpuristuminen.

Rowen sellillä tehtyjen ödometrikokeiden kuormitus-kokoonpuristumakäyristä voitiin havaita, että kuormitus-kokoonpuristumasuhde oli lähes lineaarinen jännitysvälillä 80-160 kPa saakka (kuva 20). Tämän jälkeen kokoonpuristuma kasvoi voimakkaasti kuormituksen funktiona. Kuormitus-kokoonpuristumakäyrät oli molemmilla sideaineilla kummassakin kerroksessa lähes samanlaiset.

Kokoonpuristuvuusmoduulien arvot olivat jännitysvälillä 40-80 kPa ylemmässä turvekerroksessa Finnstabi+pikasementti -seoksella 4348 kPa ja pika-sementti+masuunikuona -seoksella 3922 kPa. Alemmassa turvekerroksessa vastaavat arvot olivat Finnstabi+pikasementti -seoksella 4396 kPa ja pika-sementti+masuunikuona -seoksella 4124 kPa.

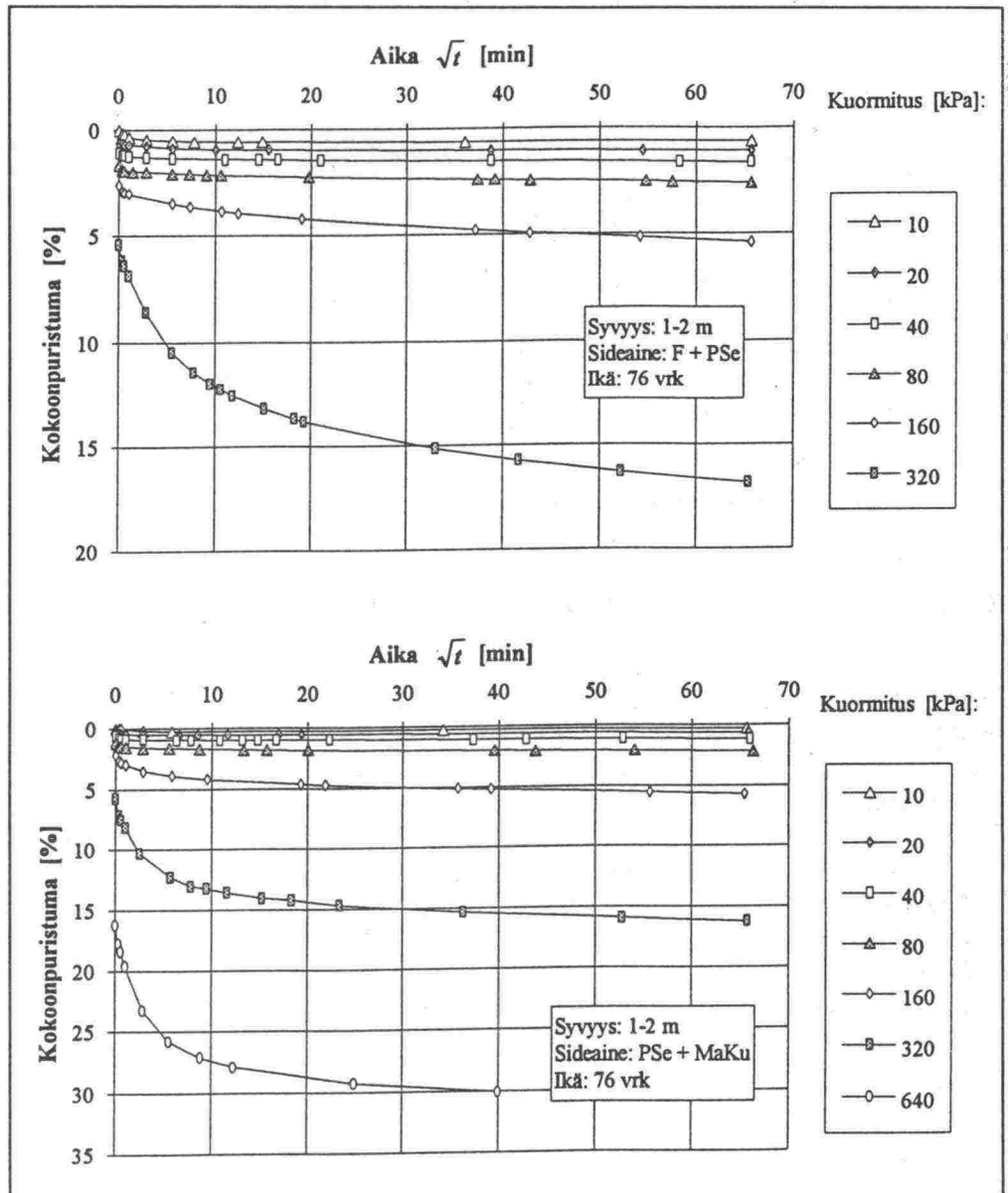


Kuva 20. Stabiloidun turpeen kuormitus-kokoonpuristumakuvaajat

Stabiloidun turpeen aika-painumakuvaajassa on havaittavissa primaari-painuman jälkeen ainoastaan vähäistä sekundaaripainumaa (kuva 21). Taylorin menetelmällä määritetty konsolidaatiokerroin c_v oli Finnstabi+pikasementtiseoksella stabiloidulla turpeella (syv. 1-2 m) jännityksellä 160 kPa suuruusluokkaa $640 \text{ m}^2/\text{a}$.

4.4.1.4 Stabiloidun turpeen vedenpidätyskyky

Stabiloidun turpeen kykyä sitoa ja luovuttaa vettä voidaan arvioida vedenpidätyskäyrän avulla. Stabiloidun turpeen tilavuusvesipitoisuus pienenee voimakkaasti, kun jännitys kasvaa suuremmaksi kuin 50 kPa (kuva 22). Molempien turvekerrosten vedenpidätyskyky on lähes samanlainen sideaineesta riippumatta. Kuvan perusteella voidaan todeta, että 5 m pohjaveden alennus pienentää stabiloidun turpeen tilavuusvesipitoisuutta merkittävästi.



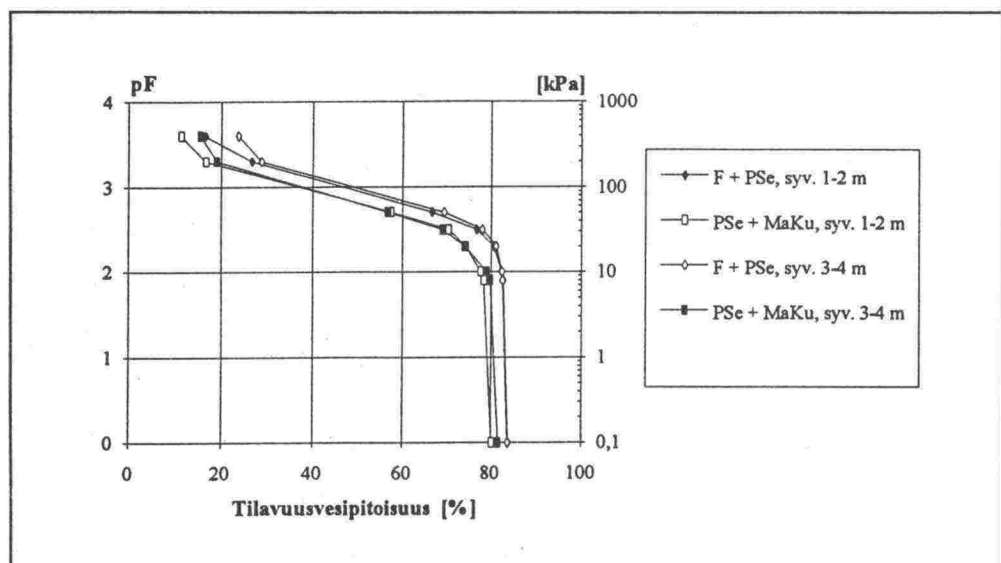
Kuva 21. Finnstabi+pikasementti -seoksella stabiloidun turpeen (syv. 1-2 m) aika-kokoonpuristumakuvaajat.

4.4.2 Stabiloidun saven ominaisuudet

4.4.2.1 Savikerrosten stabiloituvuuden arviointi

I-tutkimusvaihe

Savikerrosten stabiloituvuustutkimusten tavoitteena oli selvittää sopivimmat sideaineet ja sideainemäärät. Tiesuunnitelmavaiheen painuma- ja vakavuuslaskelmien perusteella stabiloidun saven leikkauslujuuden tavoitetasoksi oli määritetty noin 100 kPa. Näytteet valmistettiin kohdan 4.2.3 mukaisesti ja koestettiin yksiaksisiaalisella puristuskokeella 30 vrk:n lujittumisen jälkeen. Sideaineina käytettiin taulukon 14 mukaisia sideaineita ja sideaineseoksia; sideainemäärä oli 150 kg/m³.



Kuva 22. Stabiloitujen turpeiden vedenpidätyskäyrät.

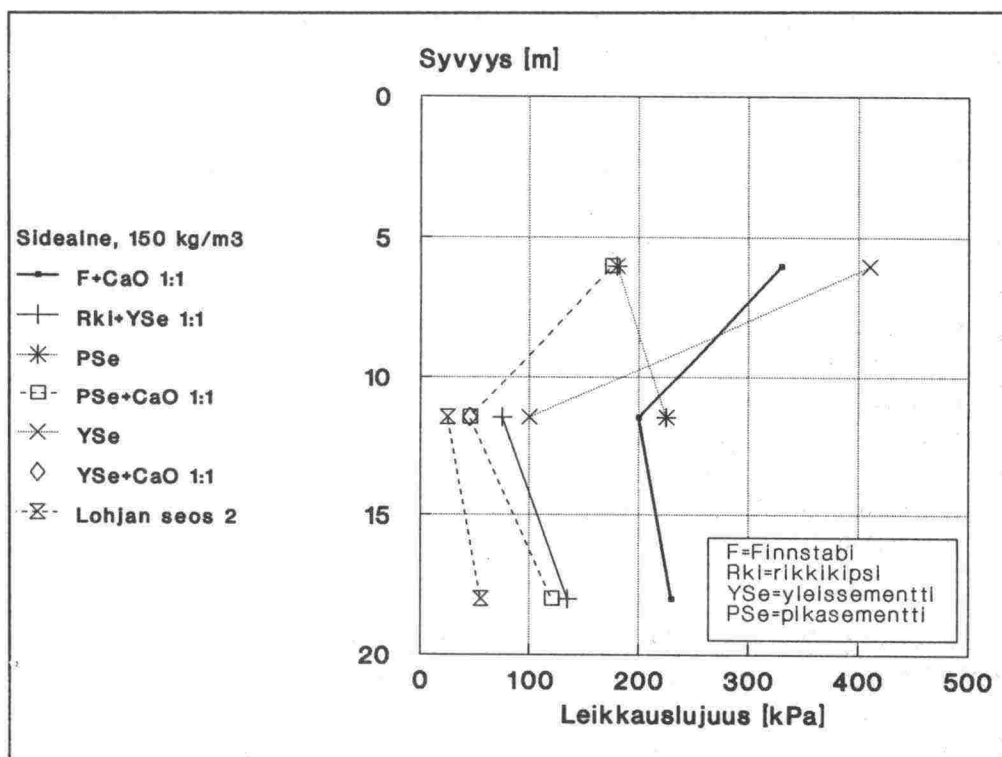
Taulukko 14. Savikerrosten stabiloinnissa käytetyt sideaineet ja sideainemäärät (kg/m^3) I-tutkimusvaiheessa.

Sideaine	Savikerros		
	5.5 - 6.5 m	11 - 12 m	17.5 - 18.5 m
Finnstabi + CaO 1:1	150	150	150
Rikkikipsi + Yleisementti 1:1		150	150
Pikaseementti	150	150	
Pikaseementti + CaO 1:1	150	150	150
Yleisementti	150	150	
Yleisementti + CaO 1:1		150	
Lohjan seos 2		150	150

Stabiloituvuudeltaan savikerrokset poikkesivat merkittävästi toisistaan. Parhaiten lujittuu ylin savikerros (syv. 5.5 - 6.5 m) ja heikoiten keskimäinen savikerros (syv. 11 - 12 m) (kuva 23). Suurin leikkauslujuus ylimmässä kerroksessa saatiin yleisementillä ($\tau = 410 \text{ kPa}$), keskimäisessä kerroksessa pikaseementillä ($\tau = 220 \text{ kPa}$) ja alimmassa kerroksessa Finnstabi+CaO-seoksella ($\tau = 230 \text{ kPa}$). Tasaisimmin eri kerroksia lujittava sideaine oli Finnstabi+CaO 1:1-seos, jolla leikkauslujuus oli suurempi kuin 200 kPa kaikissa kerroksissa.

Koetulosten hajonta rinnakkaisnäytteissä oli vähäistä, keskimäärin $15\text{--}50 \text{ kPa}$. Mikäli näytteen ulkomuoto poikkesi tavanomaisesta, tilavuuspaino oli alhaisempi, näytteessä oli kolo tai näyte oli muuten selvästi epäonnistunut ei yksittäistä koetulosta otettu huomioon.

Osassa sideaineita oli mukana myös kipsipohjaisia lisäaineita. Lujittumisessa oli merkittäviä eroja eri kipsilaatujen välillä. Lujittumiseen vaikutti kipsilaadun lisäksi myös käytetty perussideaine (CaO, sementti).



Kuva 23. Savikerrosten leikkauslujuus stabiloituna eri sideaineilla 30 vrk:n lujittumisen jälkeen.

4.4.2.2 Stabiloidun saven lujuuteen vaikuttavat tekijät

Toisen tutkimusvaiheen tavoitteena oli selvittää sideainemäärän ja ajan vaikutus I-vaiheen tulosten mukaisille parhaimmille sideaineseoksille. Syvyydeltä 11-12 m olevan saven lujuuskokeisiin valitut sideaineet ja sideainemäärät koestusajankohdittain on esitetty taulukossa 15 ja syvyydeltä 5,5-6,5 m ja 17,5-18,5 m olevien saven lujuuskokeisiin valitut materiaalit taulukossa 16. Sideainemäärän vaikutusta saven lujittumiseen tutkittiin sideainemäärillä 75-100-125-150 kg/m³. Koestusajankohdiksi valittiin 30-80-180-360 vrk.

Näytteet valmistettiin kuten esiselvitysvaiheen näytteet kohdan 4.2.3 mukaisesti. Tiivistämisen jälkeen näytteet lämpökäsiteltiin seuraavasti:

Näytteet, jotka oli stabiloitu CaO:ta sisältävillä seoksilla (Finnstabi+CaO ja yleissementti + CaO), pidettiin +40°C lämpötilassa 0-2 h ja +20°C lämpötilassa 2-48 h. Tämän jälkeen näytteet säilytettiin +8°C lämpötilassa koestushetkeen asti. Muut näytteet (yleissementti+rikinpoistojäte-seoksella, yleissementillä ja pikasementillä stabiloidut näytteet), pidettiin +20°C lämpötilassa 0-48 h. Tämän jälkeen näytteet säilytettiin +8°C lämpötilassa koestushetkeen asti.

Taulukko 15. Syvyydeltä 11-12 m olevan saven lujuuskokeisiin valitut sideaineet, sideainemäärät ja koestusajat.

Sideaine	Koestusaika ja sideaineseoksia vastaavat sideainemäärät (kg/m ³)			
	30 vrk	80 vrk	180 vrk	360 vrk
F+CaO 1:1	125	75, 100, 125*, 150	125	125
PSe+CaO 2:1	125	75, 100, 125*, 150	125	125
YSe+CaO 2:1	125	75, 100, 125*, 150	125	125
YSe+Rki 1:1	-	150*	-	-
F+YSe 1:1	125	125	-	-

*) Tähdellä merkitty sideainemäärä tarkoittaa, että näyte on koestettu kolmiaksisiaalisessa jännitystilassa.

Taulukko 16. Syvyydeltä 5,5-6,5 m ja 17,5-18,5 olevien savien lujuuskokeisiin valitut sideaineet, sideainemäärät ja koestusajat.

Sideaine	Koestusaika ja sideaineseoksia vastaavat sideainemäärät (kg/m ³)			
	30 vrk	80 vrk	180 vrk	360 vrk
F+CaO 1:1	125	100, 125*	125	125
PSe+CaO 2:1	125	100, 125*	125	125
YSe+CaO 2:1	125	100, 125*	125	125

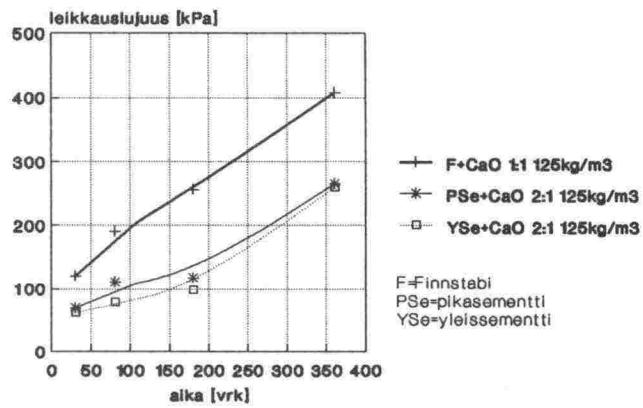
*) Tähdellä merkitty sideainemäärä tarkoittaa, että näyte on koestettu kolmiaksisiaalisessa jännitystilassa.

F on Finnstabi
YSe yleissementti
PSe pikasementti
Rki rikinpoistojäte

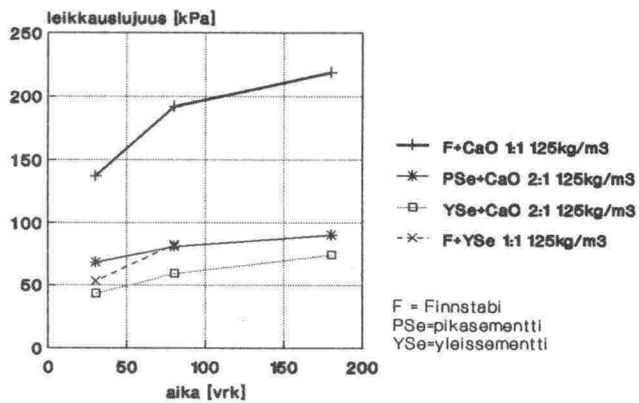
Lujittumisnopeus

Leikkauslujuus kasvaa voimakkaimmin Finnstabi+CaO -seoksella kaikissa kolmessa kerroksessa. Ylimmässä kerroksessa (syv. 5,5-6,5 m) leikkauslujuus ($\tau = 250$ kPa) on 180 vrk:n ikäisillä näytteillä yli kaksinkertainen 30 vrk:n lujuuteen ($\tau = 125$ kPa) verrattuna (kuva 24). Muissa kerroksissa leikkauslujuuden kasvu Finnstabi+CaO -seoksella oli noin 1,5-kertainen vastaaviina ajankohtina. Pikasementti+CaO ja yleissementti+CaO -seoksilla lujuus kasvaa lievästi kahdessa ylimmässä kerroksessa 30 ja 180 vrk:n välisenä aikana. Alemmassa kerroksessa sen sijaan tapahtuu leikkauslujuuden lievää pienemistä ajan funktiona.

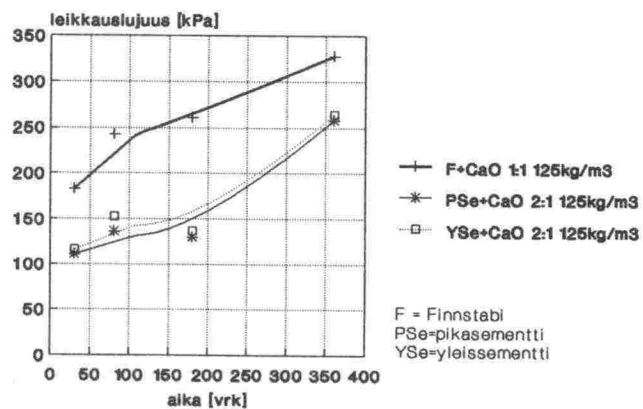
SAVI 5,5-6,5 m



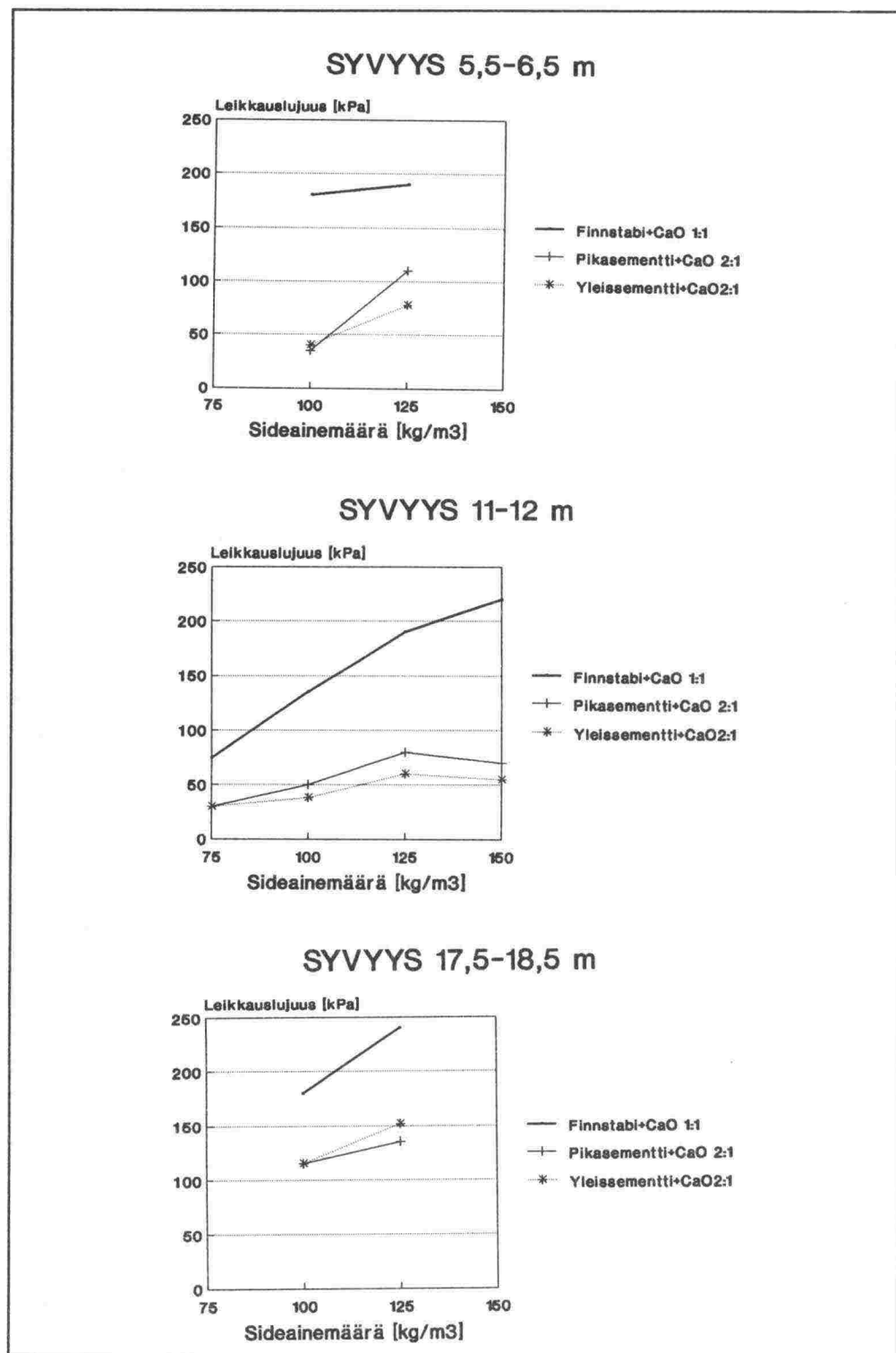
SAVI 11-12 m



SAVI 17,5-18,5 m



Kuva 24. Savikerrosten leikkauslujuuden kasvu ajan funktiona eri sideaineilla.



Kuva 25. Sideainemäärän vaikutus savikerrosten lujuuteen. Näytteet koestettu 80 vrk:n ikäisinä.

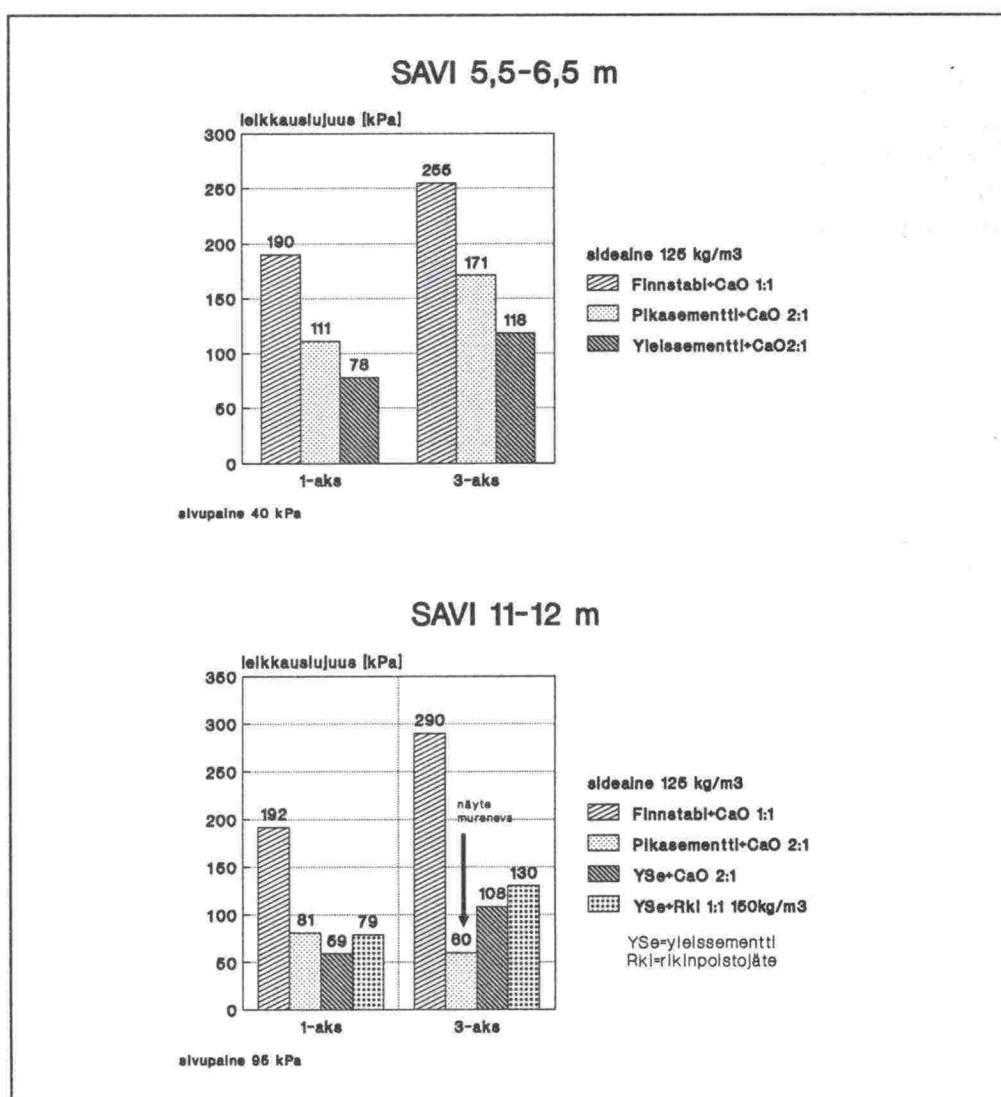
Sideainemäärän optimointi

Määräoptimoinnin tavoitteena oli selvittää sideainemäärän vaikutus leikkauslujuuteen. Määräoptimointi suoritettiin ylimmässä (syv. 5,5 - 6,5 m) ja alimmas-
sa (syv. 17,5 - 18,5 m) kerroksessa kahdella sideainepitoisuudella (100 ja 125

kg/m³) ja keskimmaisessa kerroksessa (syv. 11 - 12 m) neljällä eri sideainemäärällä (75, 100, 125 ja 150 kg/m³) 80 vrk:n lujittumisen jälkeen yksiakσιαalisella puristuskoeella. Kaikissa kerroksissa leikkauslujuus oli 125 kg/m³ sideainemäärällä suurempi kuin 100kg/m³ sideainemäärällä (kuva 25). Suurin leikkauslujuus saavutettiin jokaisessa kerroksessa Finnstabi+CaO 1:1 -seoksella kaikilla sideainepitoisuuksilla. Savikerroksessa 11 - 12 m on sen sijaan havaittavissa pikasementti+CaO ja yleissementti+CaO -seoksilla 125 kg/m³ optimisideainemäärä, jota suuremmalla pitoisuudella leikkauslujuus pienenee lievästi.

Kolmiakσιαalikokeiden tulokset

Mitoituslujuuksien tarkistamiseksi ylimpien savikerrosten (syv. 5,5 - 6,5 m ja syv. 11 - 12 m) stabiloidut näytteet koestettiin kolmiakσιαalisessa jännitystilassa suljettuna kokeena 80 vrk:n lujittumisen jälkeen. Sivupaineena käytettiin syvyydellä 5,5 - 6,5 m arvoa 40 kPa ja syvyydellä 11 - 12 m 95 kPa. Kolmiakσιαalinen jännitystila lisää leikkauslujuutta ylemmässä kerroksessa noin 30-50 % ja vastaavasti keskimmaisessa kerroksessa 50-80 %. (kuva 26).



Kuva 26. Yksi- ja kolmiakσιαalisessa jännitystilassa koestettujen stabiloitujen näytteiden leikkauslujuus. Näytteiden ikä koestuksessa oli 80 vrk.

Syv. 11 - 12 m pikasementti+CaO-seoksella kolmiaksisiaalisessa jännitystilassa leikkauslujuus jää hieman pienemmäksi yksiaalisessa tilassa mitattuun leikkauslujuuteen verrattuna. Kolmiaksisiaalikokeiden tulokset ovat kuitenkin yksittäistuloksia, mikä osaltaan voi selittää lujuuseron.

4.4.2.3 Stabiloidun saven mitoitusparametrit

III-vaihe

Lujuusparametrit

Kolmannen vaiheen tutkimuksen tavoitteena oli määrittää stabiloidun savikerroksen lujuusparametrit koerakenteen lopullista mitoittamista varten. Tutkittavaksi savikerrokseksi valittiin syvyys 11-12 m. Stabiloitujen saven jännitys-muodonmuutoskäyttäytyminen poikkeaa toisistaan. Finnstabi+CaO-seoksella 125 kg/m³ stabiloitu savi käyttäytyy hauraan materiaalin tavoin ja murtuminen tapahtuu pienellä muuodonmuutoksella (2 %) (kuva 27). Pikasementti+CaO 125 kg/m³-seoksella plastinen muodonmuutos kasvoi jännityksen kasvaessa (kuva 28).

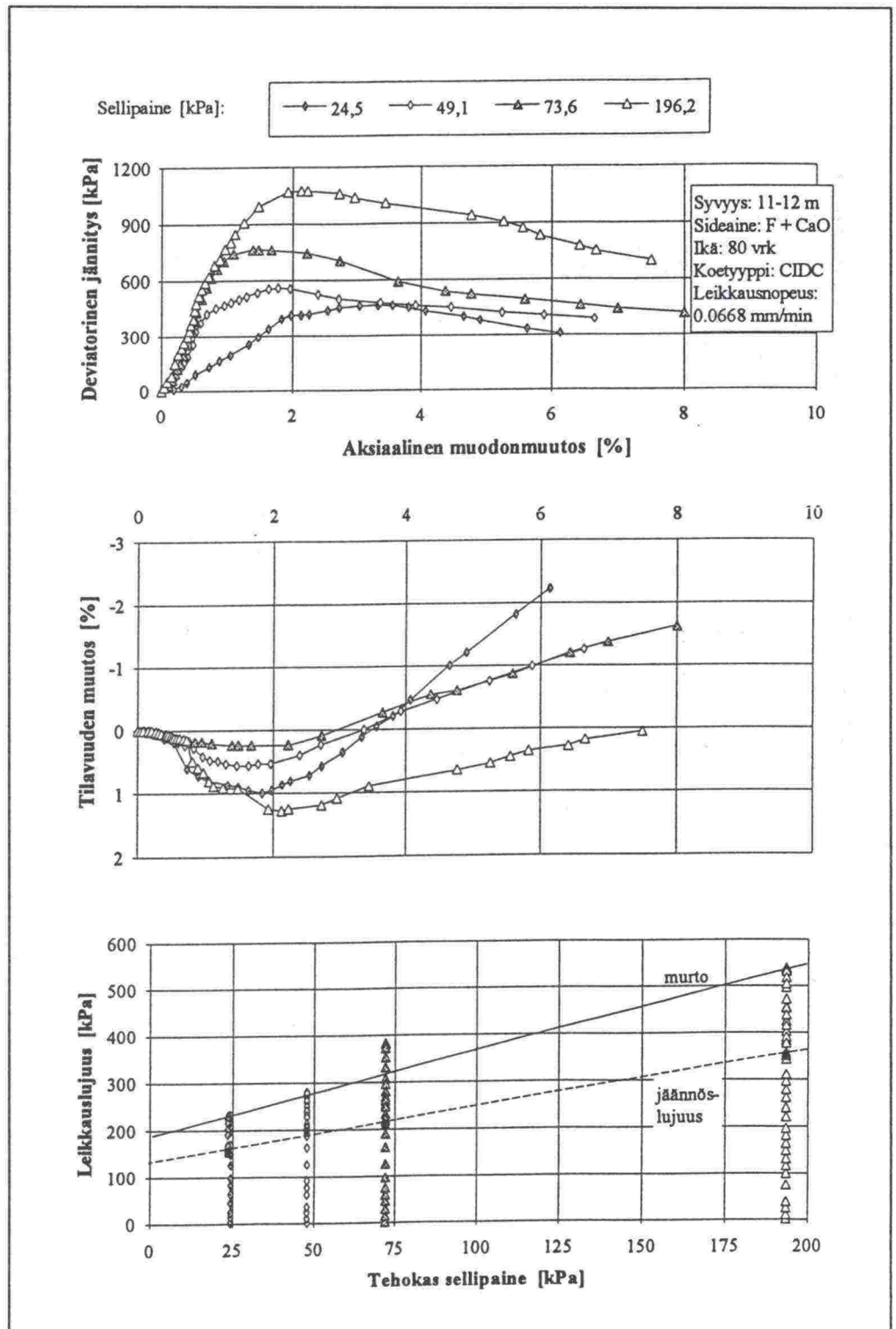
Kolmiaksisiaalikoesarjat tehtiin 80 vrk:n lujittumisen jälkeen neljällä eri sellipaineen arvolla: 24.5, 49.1, 73.6 ja 196.2 kPa. Finnstabi+CaO-seoksella tehokas kitkakulma $\phi = 40^\circ$ oli 13° suurempi kuin pikasementti+CaO-seoksella (taulukko 17). Tehokas koheesio oli puolestaan pikasementti+CaO-seoksella hieman suurempi Finnstabi+CaO-seokseen verrattuna. Sideaineita vertailtaessa on huomioitava, että pikasementti+CaO-seoksella maksimileikkauslujuus saavutetaan suuremmalla muodonmuutoksella kuin Finnstabi+CaO-seoksella.

Taulukko 17. Stabiloidun saven lujuusparametrit

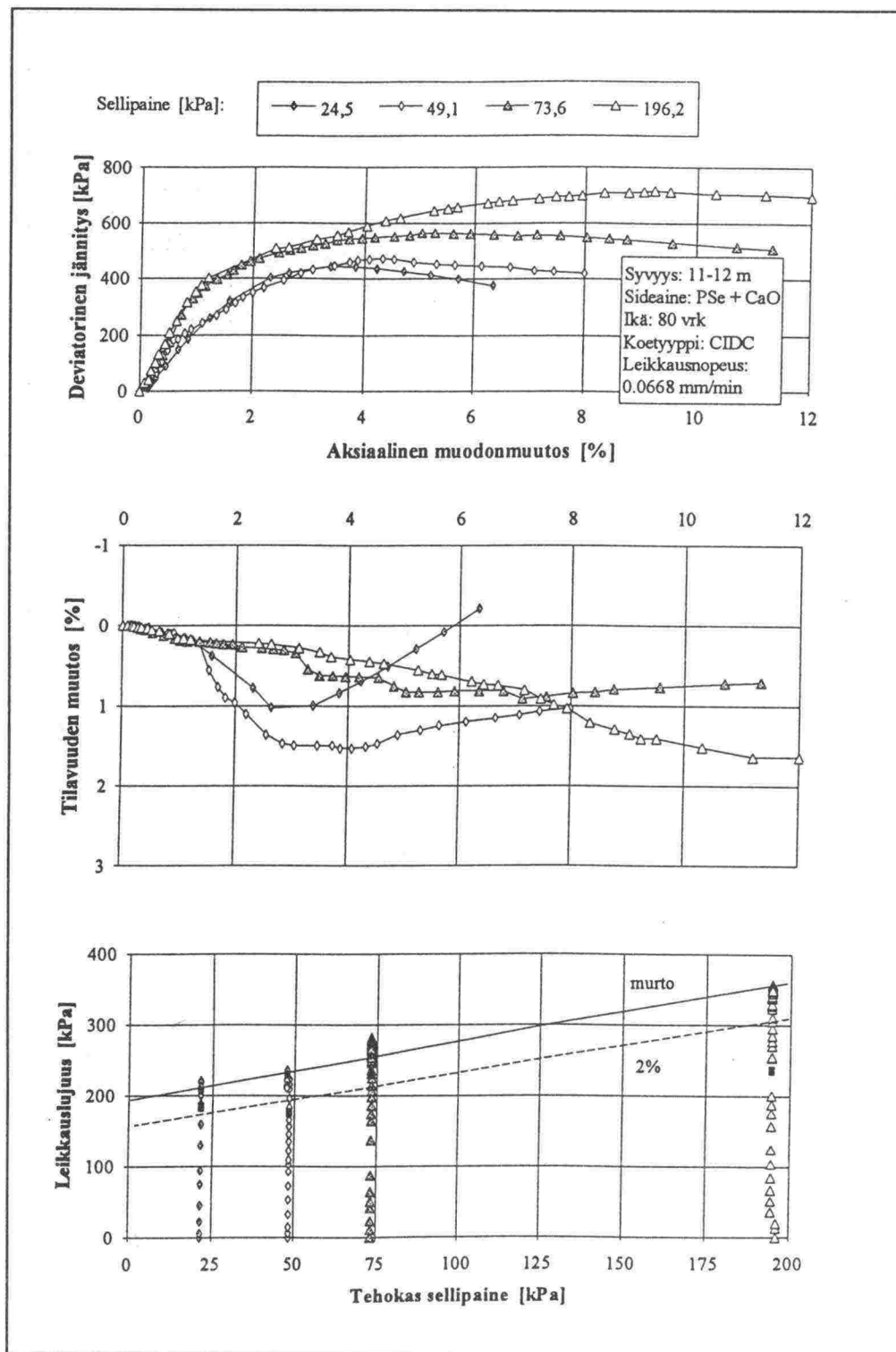
Sideaine	c' (kPa)	ϕ' (ast.)
F + CaO, 1:1, 125 kg/m ³	87,7	40,0
PSe + CaO, 2:1, 125 kg/m ³	119,8	26,9

Muodonmuutosominaisuudet

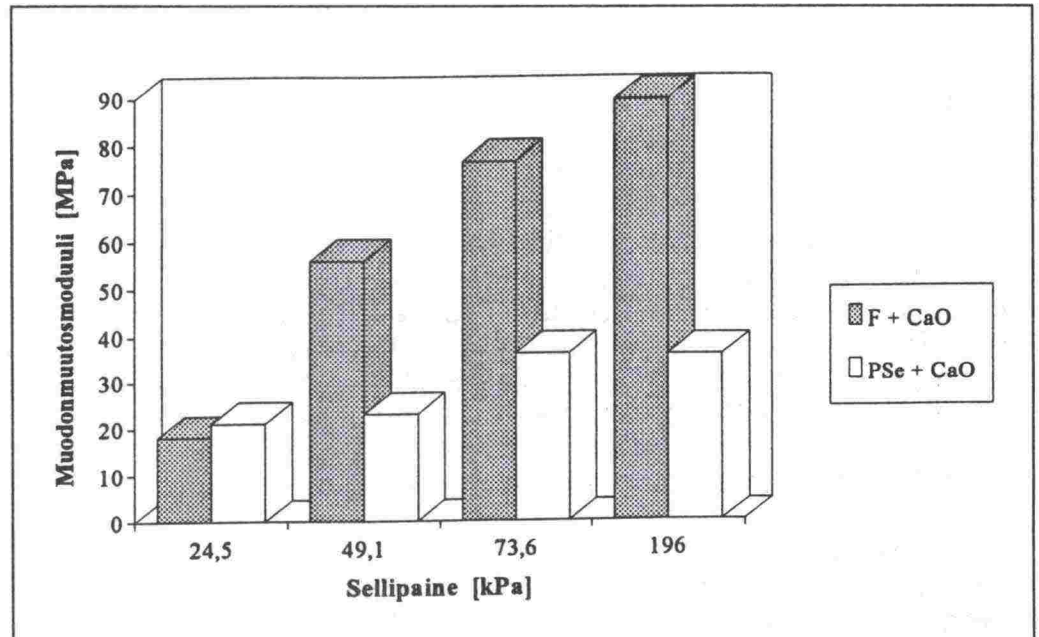
Stabiloidun saven avoimen tilan muodonmuutosmoduulit E olivat Finnstabi+CaO-seoksella noin kaksinkertaisia verrattuna pikasementti+CaO-seokseen (kuva 29). Ainoastaan sellipaineella 24.5 kPa oli muodonmuutosmoduuli suurempi pikasementti+CaO-seoksella.



Kuva 27. Kolmiaksaalikoe, Finnstabi+CaO 1:1 125 kg/m³ -seoksella stabiloitu savi.



Kuva 28. Kolmiaksaalikoe, pikasementti+CaO 1:1 125 kg/m³-seoksella stabi-
loitu savi.



Kuva 29. Stabiloidun saven avoimen tilan muodonmuutosmoduulit E.

4.5 Sideaineen valinta koerakenteisiin

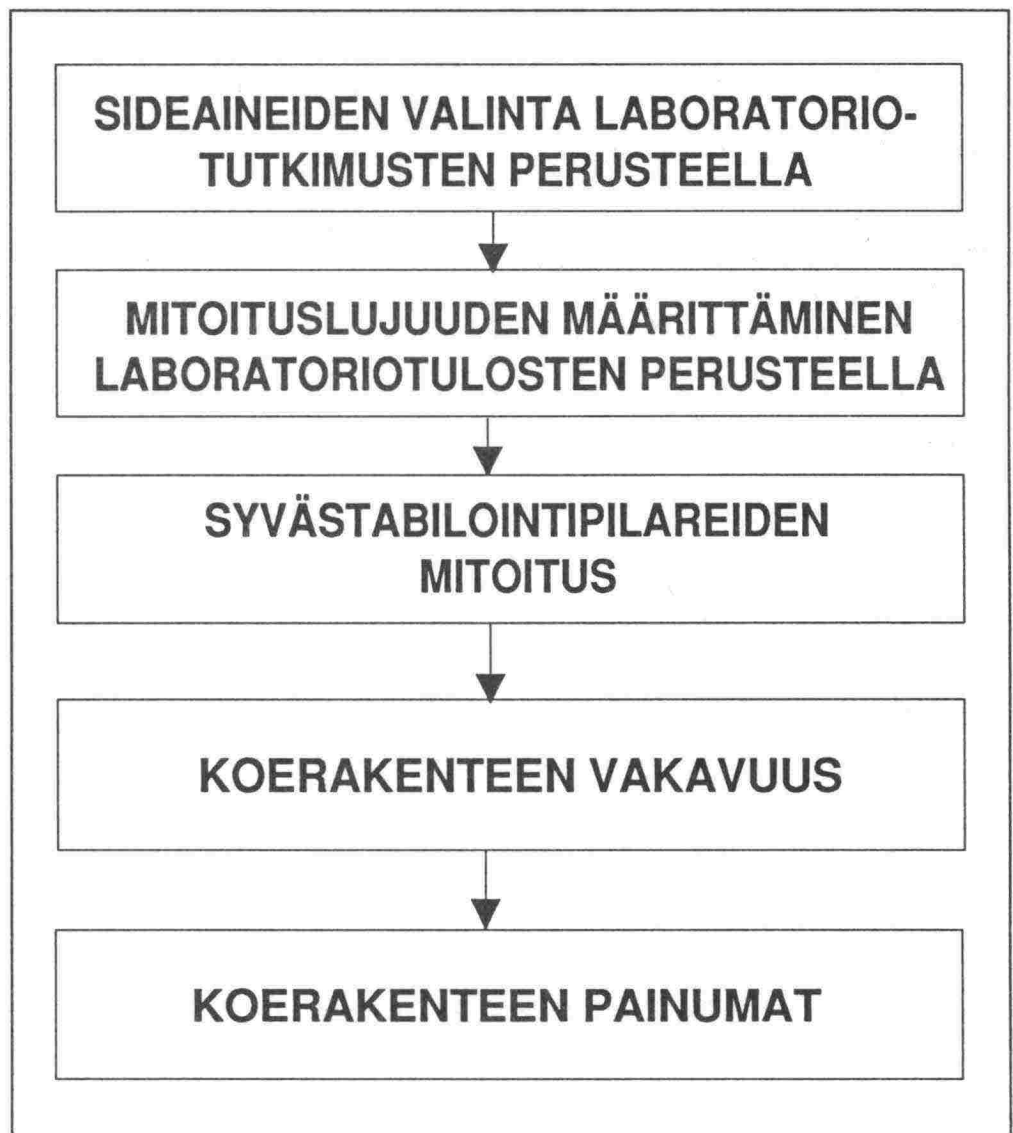
Laboratoriossa tehtyjen stabiloidun turpeen kokoonpuristuvuuskokeiden tulosten mukaan suurimmat painumat tapahtuivat alemmassa turvekerroksessa. Finnstabi+pikasementti-seoksella ja pikasementti+masuunikuona-seoksella stabiloitujen näytteiden painumat alemmassa kerroksessa jäivät kuitenkin selvästi muilla sideaineilla stabiloitujen näytteiden painumia pienemmiksi. Koska myös lujuuskokeissa Finnstabi+pikasementti-seoksella ja pikasementti+masuunikuona-seoksella stabiloitujen näytteiden lujuudet olivat paremmat kuin muiden näytteiden, valittiin nämä seokset koerakenteeseen turpeen stabilointia varten. Sideainemääräksi valittiin laboratoriokokeiden mukaiset 250 kg/m^3 (Finnstabi+pikasementti) ja 300 kg/m^3 (pikasementti+masuunikuona).

Parhaimmat lujuudet saven stabiloituvuuskokeissa saavutettiin Finnstabi+CaO 1:1-seoksella jokaisessa savikerroksessa. Sideainemääräksi valittiin 125 kg/m^3 . Koska koerakenteessa päätettiin käyttää halkaisijaltaan 700 mm pilareita, oli niitä vastaava sideainemäärä $0,385 \text{ m}^2 \times 125 \text{ kg/m}^3 = 48 \text{ kg/m}$.

Maanpinta koerakenteen alueella on tasolla noin +68.5. Koerakenteen kohdalla turpeen paksuus on noin 3 m. Turpeen pintaosa (noin puolet) on raakaturvetta ja puolet keskinkertaisesti maatunutta turvetta. Turvekerrosten alapuolella on noin 15 m paksu savikerros, joka on yläosastaan erittäin pehmeää liejusavea. Savikerroksen alapuolella ovat siltti-, hiekka- ja hiekkamoreenikerrokset. Koekenttä sijoittuu ojitetulle suoalueelle, jossa pohjavedenpinta on havaittu noin 2 m syvyydessä maanpinnasta syksyllä 1991 suoritetun näytteenoton yhteydessä.

5.1.3 Koerakenteen suunnittelu ja mitoitus

Koerakenteen mitoituksen eteneminen vaiheittain on esitetty kuvassa 31.



Kuva 31. Koerakenteen mitoituksen periaate

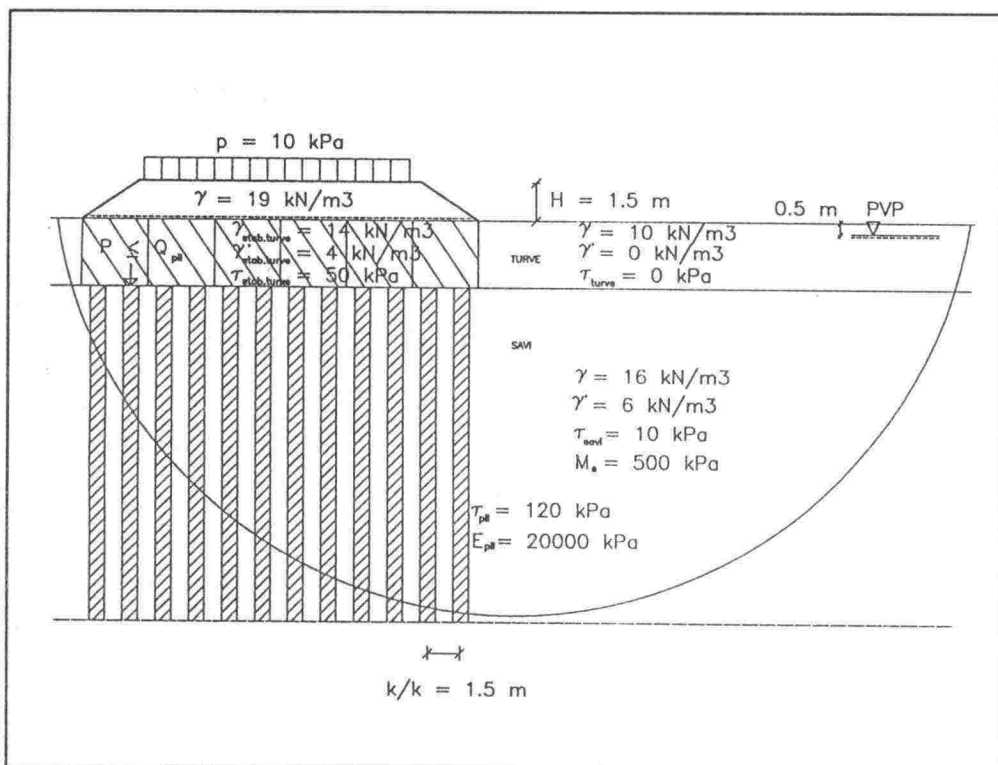
Stabiloidun turpeen ja saven mitoituslujuus

Turpeen stabiloinnin mitoituksessa on ollut tavoitteena saada aikaan kuiva-kuorikerroksen kaltainen homogeeninen lujittunut kerros savikerroksen päälle. Stabiloitu turve toimii tällöin laattamaisesti jakaen kuormat alapuoliseen pilaristabiloituun savikerrokseen.

Stabiloitujen turvenäytteiden 80 vrk:n puristuslujuus laboratoriossa oli molemmilla koerakenteeseen valitulla sideaineyhdistelmällä pienimmillään noin 150 kPa, jolloin leikkauslujuudeksi saadaan keskimäärin 75 kPa. Koerakennetta varten laboratoriossa määritettyä leikkauslujuuden arvoa redusoiitiin varmuuskertoimella 1.5, jolloin lamellistabiloidun turpeen tavoitelujuudeksi saadaan $S_u = 50$ kPa. Stabiloidun turpeen lujuutta redusoiitiin laboratoriokoetuloksiin verrattuna, koska oletettiin, että stabiloidun turpeen lujuus maastossa jää alemmalle tasolle mm. sekoitustyön tehokkuudessa ja tasaisuudessa olevien erojen vuoksi. Stabiloitua turvetta on laskelmissa käsitelty yhtenä kerroksena.

Syvästabilointipilarien mitoitus

Saven tehtyjen pilareiden pilariväli laskettiin pilarin kantavuuden perusteella. Kantavuusmitoitus tehtiin syvästabilointiohjeen STO-91 mukaisesti pilarin myötökuormaan (Broms) perustuen. Laskentaparametrit on esitetty kuvassa 32. Pilarin myötökuorma voidaan laskea kaavasta



Kuva 32. Koerakenteen mitoituksessa käytetyt parametrit.

$$Q_m = 0.7 * [2 * \tau + K_p * q] * A_p$$

Q_m on pilarin myötökuorma
 τ pilarin leikkauslujuus
 K_p passiivipaineen kerroin
 q vertikaalijännitys tarkastelusyvydellä
 A_p pilarin ala ($A_p = 0.385 \text{ m}^2$, kun pilarin $d = 700 \text{ mm}$)

Saveen tehtyjen pilareiden yläpään sijaitessa noin kolmen metrin syvyydessä otettiin kantavuutta laskettaessa huomioon myös pilareita tukeva passiivipaine. Passiivipaineen kerroin K_p laskettiin kaavasta

$$K_p = \tan^2 (45^\circ + \phi/2) = \tan^2 (45^\circ + 15^\circ/2) = 1,70$$

Passiivipaineen kertoimen arvo vaihtelee savelle käytetyn kitkakulman arvosta riippuen välillä $K_p = 1.0 \dots 3.0$. Tässä tarkastelussa kitkakulman arvioitiin olevan $\phi = 15^\circ$. Lepopaineelle mitoitettaessa saven K_0 on tavallisesti välillä $0.5 \dots 0.8$.

Stabiloidun turpeen tilavuuspainon arvona käytettiin $\gamma = 14 \text{ kN/m}^3$ ($\gamma' = 4 \text{ kN/m}^3$) ja pengermateriaalin tilavuuspainona $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$. Pohjavedenpinta oletettiin 0.5 m syvyyteen, jolloin pilarin yläpäässä vallitsevaksi vertikaalijännitykseksi saadaan

$$q = 1.5 \text{ m} * 19 \text{ kN/m}^3 + 0.5 \text{ m} * 14 \text{ kN/m}^3 + 2.5 \text{ m} * 4 \text{ kN/m}^3 = 45.5 \text{ kN/m}^2$$

Tällöin pilarin myötökuormaksi Q_m saadaan kaavasta

$$Q_m = 0.7 * [2 * \tau + K_p * q] * A_p = 0.7 * [2 * 120 + 1.70 * 45.5] * 0.385 = 85 \text{ kN}$$

Mikäli pilareita tukevaa horisontaalijännitystä ei oteta huomioon, saadaan pilarin myötökuormaksi

$$Q_m = 0.7 * 2 * \tau * A_p = 0.7 * 2 * 120 * 0.385 = 64.7 \text{ kN}$$

Kun oletetaan kuorman jakautuvan pilarin ja saven kokoonpuristuvuusmoduulien suhteessa pilarille ja ympäröivälle savelle, saadaan pilariväli laskettua kaavasta

$$k/k = \sqrt{A_p * \frac{\left(1 - \frac{M_s}{E_p}\right)}{\left(\frac{q * A_p}{Q_m} - \frac{M_s}{E_p}\right)}}$$

M_s on saven muodonmuutosmoduuli = 500 kPa
 E_p pilarin kimmomoduli = 20000 kPa

Sijoittamalla arvot yö. kaavaan saadaan pilariväliksi $k/k = 1.45 \text{ m} \approx 1.5 \text{ m}$.

Penkereen vakavuus

Koerakenteen mitoitus penkereen stabiliteetin suhteen tehtiin käyttäen ympyränmuotoisia liukupintoja ja $\phi=0$ - menetelmää. Mitoitusparametrit on esitetty kuvassa 32.

Pengermateriaalin kitkaa eikä stabiloimattoman turpeen lujuutta otettu huomioon. Stabiloidun turpeen alapuolisten savikerrosten suhteen vakavuuslaskelmat tehtiin kahdessa eri laskentatilanteessa. Ensimmäisessä laskentatilanteessa saveen tehtyjen stabiloitujen pilareiden lujuutta ei otettu huomioon laskelmas-
sa, vaan leikkauslujuutena käytettiin turpeen alapuolisen saven suljetun leikkauslujuuden arvoja. Tämän laskentatilanteen katsottiin vastaavan äkillistä murtotilannetta, jossa stabiloidun turpeen murtuessa laattamaisesti stabiloidun turpeen alapuolisten pilaroidun vyöhykkeen muodonmuutos on jo niin suuri, että pilarit ovat menettäneet lujittavan vaikutuksensa. Tällöin saatiin 1.5 m korkean penkereen stabiliteetiksi $F=1.94$. Toisessa laskentatilanteessa käytettiin stabiloidun saven lujuutena pilarien ja saven pinta-alalla painotettua keskimääräistä leikkauslujuuden arvoa. Tällöin saatiin varmuudeksi penkereen sortumista vastaan $F=2.31$.

Pilaristabiloidun turpeen tavoitelujuudeksi valittiin kuten edellä 50 kPa, jolloin stabiloidun turpeen keskimääräiseksi leikkauslujuudeksi saatiin 34 kPa. Stabiloimattoman turpeen lujuutena käytettiin 0 kPa. Tällöin saatiin 1.5 m korkean penkereen stabiliteetiksi käyttäen savessa keskimääräisiä leikkauslujuuden arvoja $F=1.87$. Toisessa laskentatilanteessa varmuuskertoimeksi saatiin $F=2.21$.

Varmuuserroin on sekä pilari- että lamellistabiloidussa tapauksessa lähes sama, koska stabiloitu turve murtuu laattamaisena rakenteena liukupinnan kulkiessa stabiloidun vyöhykkeen takaa. Stabiloidun turpeen tehtävänä on toimia kuivakuoreen verrattavana lujittuneena ja painumattomana vyöhykkeenä.

Koerakenteen painumat

Koerakenteen painumiksi stabiloidun turpeen osuudella arvioitiin stabiloiduilla näytteillä tehtyjen ödometrikokeiden perusteella noin 10-15 % eli 300-450 mm. Pilaroidun vyöhykkeen painumat laskettiin luonnontilaisen saven ja pilarien muodonmuutosmoduulien suhteen perusteella kaavasta

$$S = [q \cdot L] / [a \cdot E_p + (1 - a) \cdot M_s]$$

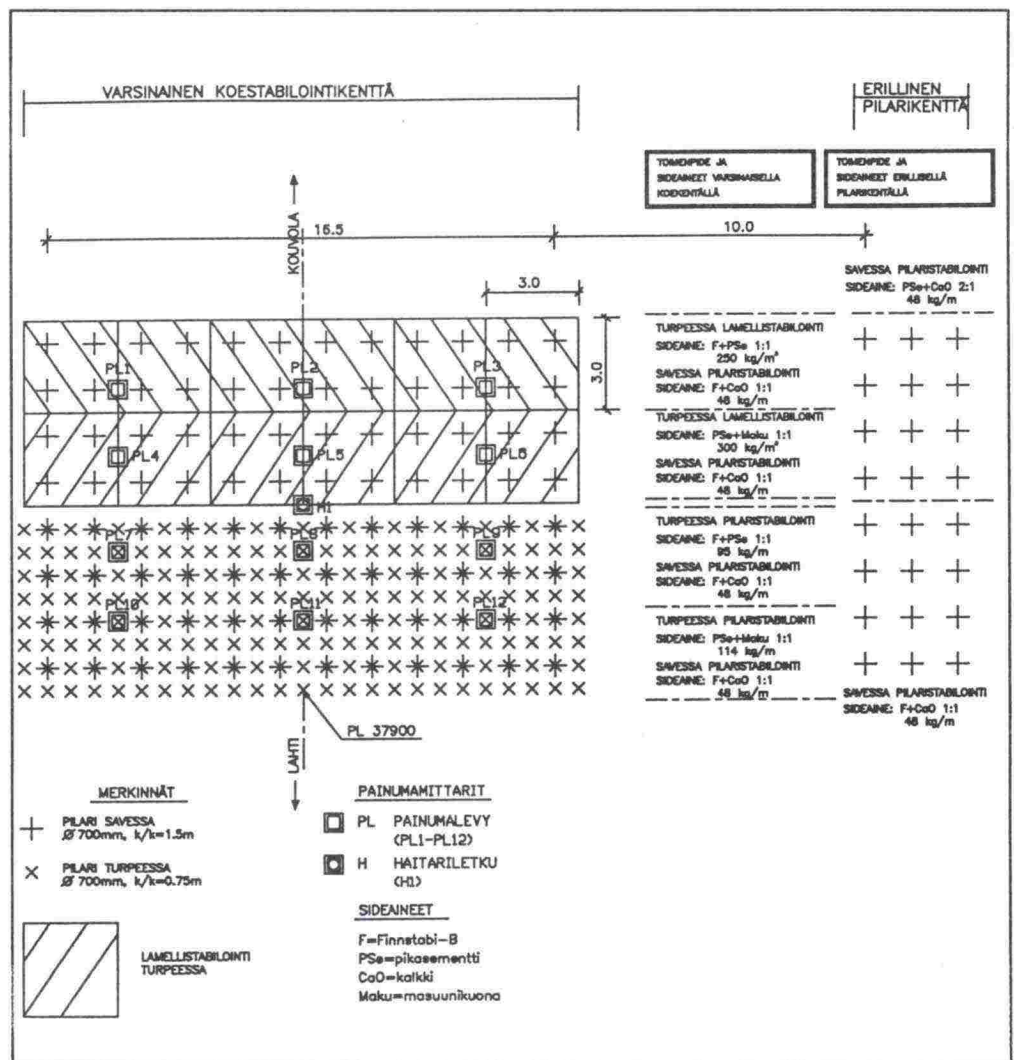
M_s	on	saven muodonmuutosmoduuli = 500 kPa
E_p		pilarin kimmomoduuli = 20000 kPa
a		suhteellinen pilariala = $A_p / (k/k)^2 = 0.171$
L		pilarin pituus = 15 m
q		pilarin yläpäässä vallitseva vertikaalijännitys = 45.5 kPa

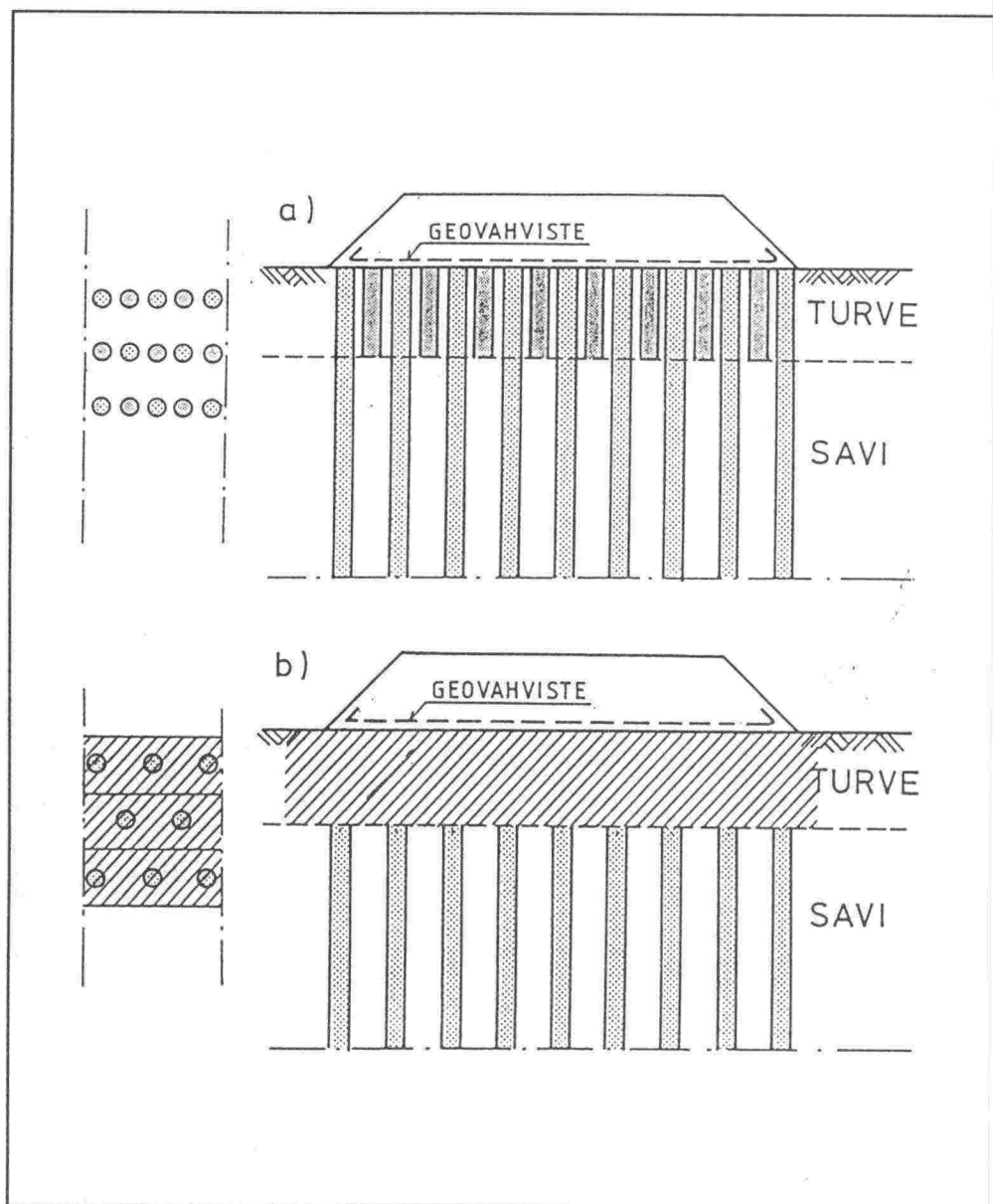
Sijoittamalla arvot kaavaan saadaan painumaksi 180 mm. Tässä laskentatavassa pilarien kuormitus siirtyy samansuuruisena pilarien alapäähän asti. Mikäli oletetaan, että jännitys jakautuu Boussinesqin jännitysjakauman mukaisesti, saadaan pilaroidun savivyöhykkeen painumiksi 80 - 120 mm. Tällöin koerakenteen kokonaispainumaksi saadaan 380 - 630 mm, kun otetaan huomioon sekä stabiloidun turpeen että saven osuus.

5.1.4 Rakennerratkaisut ja toteutus

Koekenttä muodostuu saveen tehdyistä stabiloiduista pilareista ja turpeeseen tehdyistä stabiloiduista pilareista sekä stabiloiduista lamelleista (kuvat 33 ja 34).

Stabiloitujen pilareiden halkaisija on 700 mm sekä savessa että turpeessa. Pilaripituus savessa on noin 15 m ja turpeessa 3 m. Stabiloidun turvelamellin pinta-ala on $3 \times 3 \text{ m}^2$. Lamellistabilointi suoritettiin kuvan 35 mukaisella kaivinkoneen alustaan asennetulla laitteistolla. Varsinaisen koekentän mitat ovat noin $13 \times 18 \text{ m}^2$, jonka lisäksi tehtiin pienempi erillinen pilarikenttä varsinaisen pilarikentän viereen noin 10 m etäisyydelle siitä. Erillisessä pilarikentässä tehtiin syvästabiloidut pilarit ainoastaan savikerrokseen ja siinäkin määräsyvyydelle (15 m maanpinnasta). Erillinen pilarikenttä tehtiin, koska varsinaisen koekentän pilareita olisi vaikeaa tutkia koepengerrakenteen läpi.





Kuva 34. Koerakenteen periaateleikkaus. a) Pilareilla lujitettu turve ja savi. b) Lamelleittain stabiloitu turve ja pilareilla lujitettu savi.

Turpeen stabiloinnissa käytettiin kahta sideaineyhdistelmää:

	Lamellistab.	Pilaristab.
Finnstabi + pikasementti	250 kg/m ³	95 kg/m
pikasementti + masuunikuona	300 kg/m ³	114 kg/m

Varsinaisen koekentän pilaristabilointi savessa tehtiin Finnstabin ja kalkin seoksella (F+CaO 1:1 48 kg/m). Erillisessä pilarikentässä käytettiin kahta sideaineyhdistelmää:



Kuva 35. Lamellistabilointilaitteisto

Finnstabi + CaO	1:1	125 kg/m ³	(48 kg/m Ø 700 mm pilarille)
pikasementti + CaO	2:1	125 kg/m ³	(48 kg/m Ø 700 mm pilarille)

Stabiloinnin työnaikainen laadunseuranta tehtiin erillisen työkohtaisen suunnitelman mukaisesti. Työnaikaiseen seurantaan kuului sideaineen laadun, syötön tasaisuuden, sekoitustyön tehokkuuden ja sideaineen määrän tarkkailu.

Penkereen alaosaan levitettiin vahvistinkankaat (50 kN/m) penkereen poikisuuntaan. Vahvistinkankaan levittämisen jälkeen asennettiin paikoilleen painumalevyt (12 kpl) ja haitariletku. Haitariletkulla seurattiin kerroksittain tapahtuvaa painumaa. Painumaletkun anturit sijoitettiin maanpinnan tasoon sekä 2, 4, 7 ja 12 m syvyydelle maanpinnasta.

Penger rakennettiin kahdessa vaiheessa. I-vaiheen penkereen tarkoituksena oli kuormittaa stabiloitua turvetta siten, että rakenne tiivistyy. II-vaiheessa rakennettiin varsinaista tiepengertä jäljittelevä korotuspenger.

I-vaiheessa rakennettiin 0.5 m korkea penger. Penkereen rakennusmateriaalina käytettiin hiekkaa. Penger tiivistettiin kerroksittain työkonella. Pengermateriaalin tilavuuspaino ja rakeisuus määritettiin laboratorioissa sekä maastossa vesivolymetrikokein. Tilavuuspainon keskiarvoksi saatiin 18.9 kN/m³.

Kuukauden kuluttua stabiloinnin valmistumisesta I-vaiheen penkereen päälle ajettiin 1.0 m korkea korotuspenger. Penger rakennettiin samasta materiaalista kuin I-vaiheen penger kerroksittain tiivistäen.

5.2 Koerakenteiden seurantatutkimukset

5.2.1 Koerakenteiden painumamittaukset

Painumatarkkailu aloitettiin välittömästi penkereen rakentamisen jälkeen. Ensimmäisen viikon aikana painumia mitattiin päivittäin. Tämän jälkeen painumat mitattiin kaksi kertaa viikossa. Myös penkereen korotuksen jälkeen painumia mitattiin päivittäin viikon ajan. Tämän jälkeen painumat mitattiin kaksi kertaa viikossa kolmen viikon ajan, jonka jälkeen siirryttiin kerran kuukaudessa suoritettavaan painumatarkkailuun.

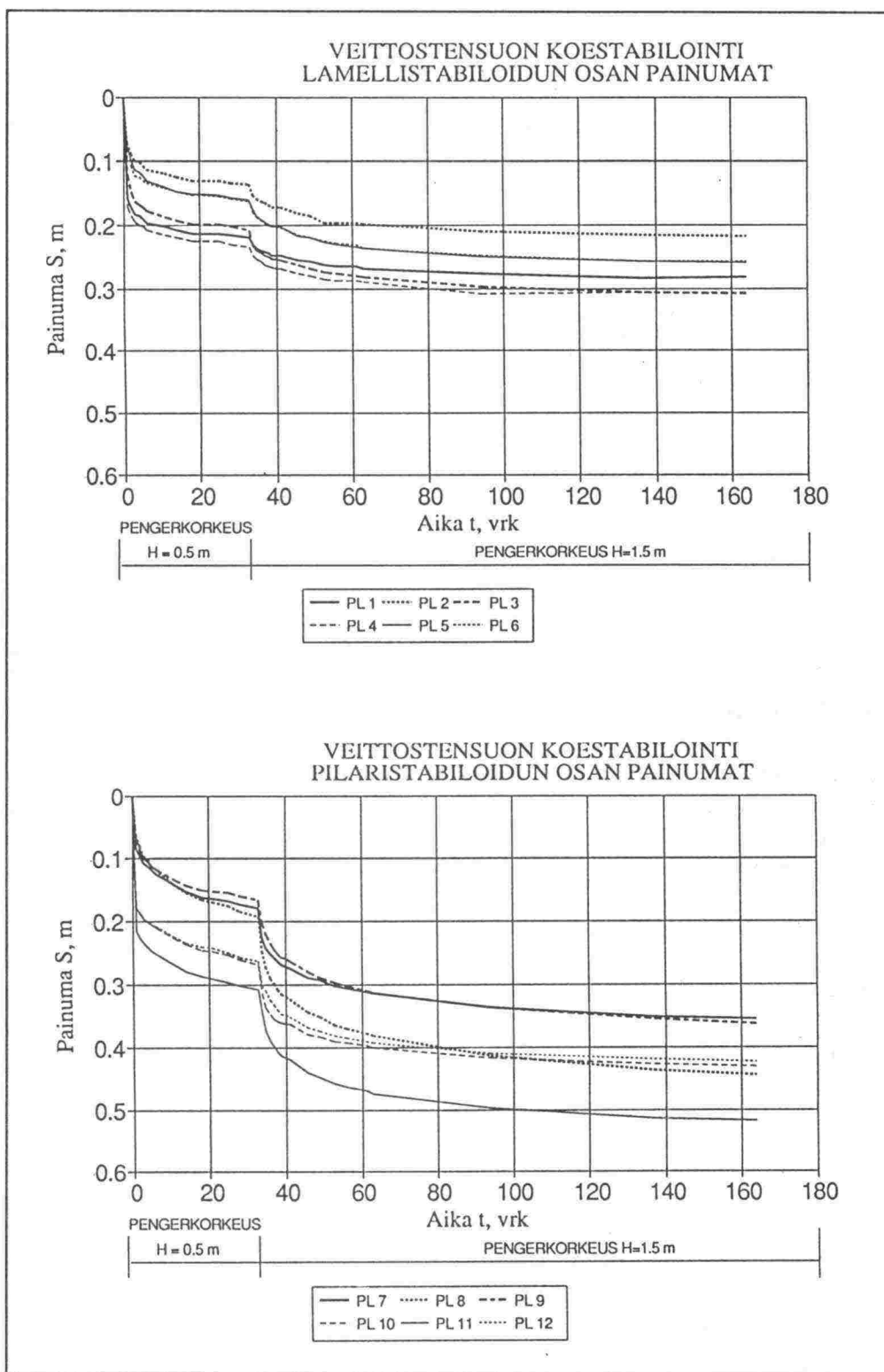
Painumatarkkailutulokset osoittavat, että suurin osa painumista tapahtuu stabiloidun turpeen tiivistyessä muutaman ensimmäisen päivän aikana. Lamellistabiloidun turpeen alueella koepenkereen kokonaispainumat olivat ensimmäisen pengerrysvaiheen aikana (noin 30 vrk) 140-240 mm ja vastaavasti pilaristabiloidun turpeen alueella 160-310 mm (kuva 36). Toisen pengerrysvaiheen jälkeen havaitut kokonaispainumat ovat olleet lamellistabiloidulla osalla 210-310 mm ja pilaristabiloidulla osalla 340-500 mm. Haitariletkumittausten perusteella voidaan päätellä, että suurin osa painumista tapahtuu stabiloidun turpeen osalla ja syvemmällä savikerroksissa painumat jäävät pienemmiksi (kuva 37). Stabiloidun turpeen painuman osuus on ollut noin 140 mm ja stabiloidun saven noin 70 mm.

Eri sideaineilla stabiloitujen osuuksien muodonmuutoskäyttäytymisessä ei ole merkittäviä eroja. Lamellistabiloidulla osuudella keskimääräiset painumat ovat samansuuruiset sekä Finnstabilla ja pikasementillä että pikasementillä ja masuunikuonalla stabiloiduilla alueilla. Pilaristabiloidulla alueella on painunut eniten pikasementin ja masuunikuonan seoksella stabiloitu alue.

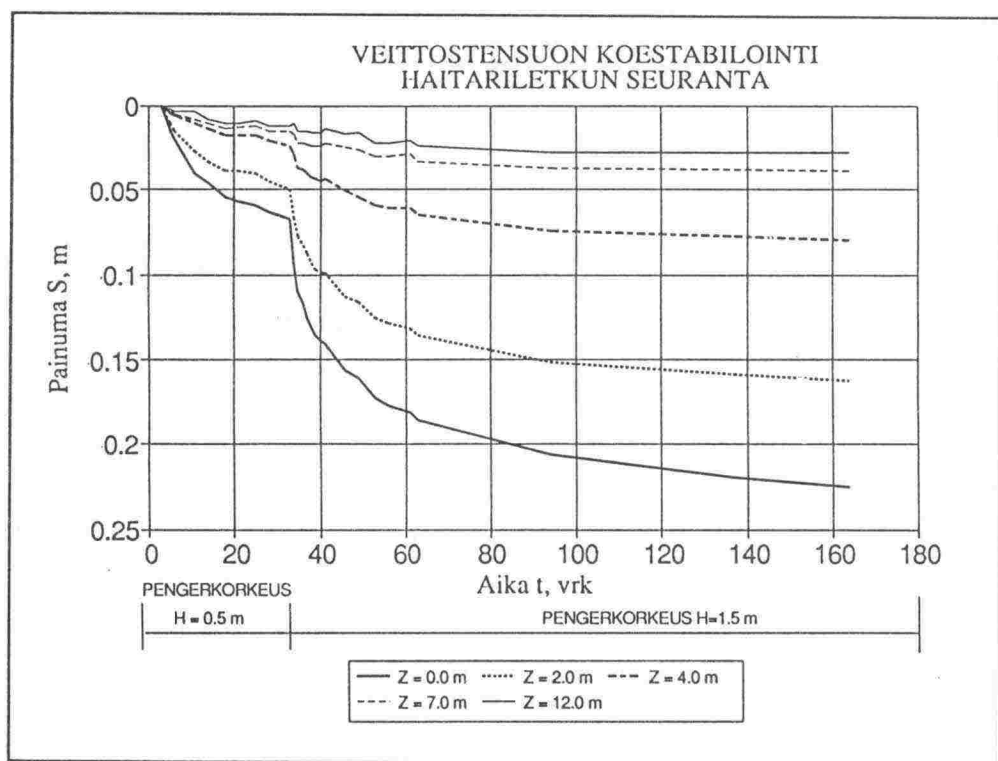
5.2.2 Stabiloitujen kerrosten lujuus

Stabiloidun saven ja turpeen lujuusominaisuuksien selvittämiseksi tehtiin koestabilointikentällä pilarikairauksia ja pilarisiipikairauksia.

Stabilointikairaukset tehtiin 30 vrk:n ikäisille pilareille. Varsinaisen koepenkereen alueella tehtiin lamellistabiloidun turpeen osuudella 6 pilarikairauksia ja 3 pilarisiipikairauksia molempien sideaineiden osa-alueilla eli yhteensä 12 pilarikairauksia ja 6 pilarisiipikairauksia. Pilaristabiloidun turpeen osalla tehtiin 5 pilarikairauksia ja 3 pilarisiipikairauksia molempien sideaineiden osa-alueilla eli yhteensä 10 pilarikairauksia ja 6 pilarisiipikairauksia. Turpeen alapuolisen saven lujittumista tutkittiin erillisellä pilarikentällä tehdyillä kairauksilla. Kummankin sideaineen osa-alueella tehtiin 2 pilarisiipikairauksia ja 3 pilarikairauksia eli yhteensä 4 pilarisiipikairauksia ja 6 pilarikairauksia. Lisäksi tehtiin vertailukairaukset stabiloimattomassa luonnonmaassa.



Kuva 36. Painumamittaustulokset



Kuva 37. Haitariletkumittausten tulokset

Erillisen pilarikentän Finnstabi+CaO-seoksella stabiloidusta pilarista 105 suoritettu pilarikairausdiagrammi ja sen tulkinta on esitetty kuvassa 38. Pilarin leikkauslujuus voidaan arvioida puristinkairausvastuksen perusteella KPO-86:n mukaisesti kaavasta:

$$\tau_p = k \cdot (p / A)$$

τ_p on pilarin likimääräinen leikkauslujuus

p kairausvastus

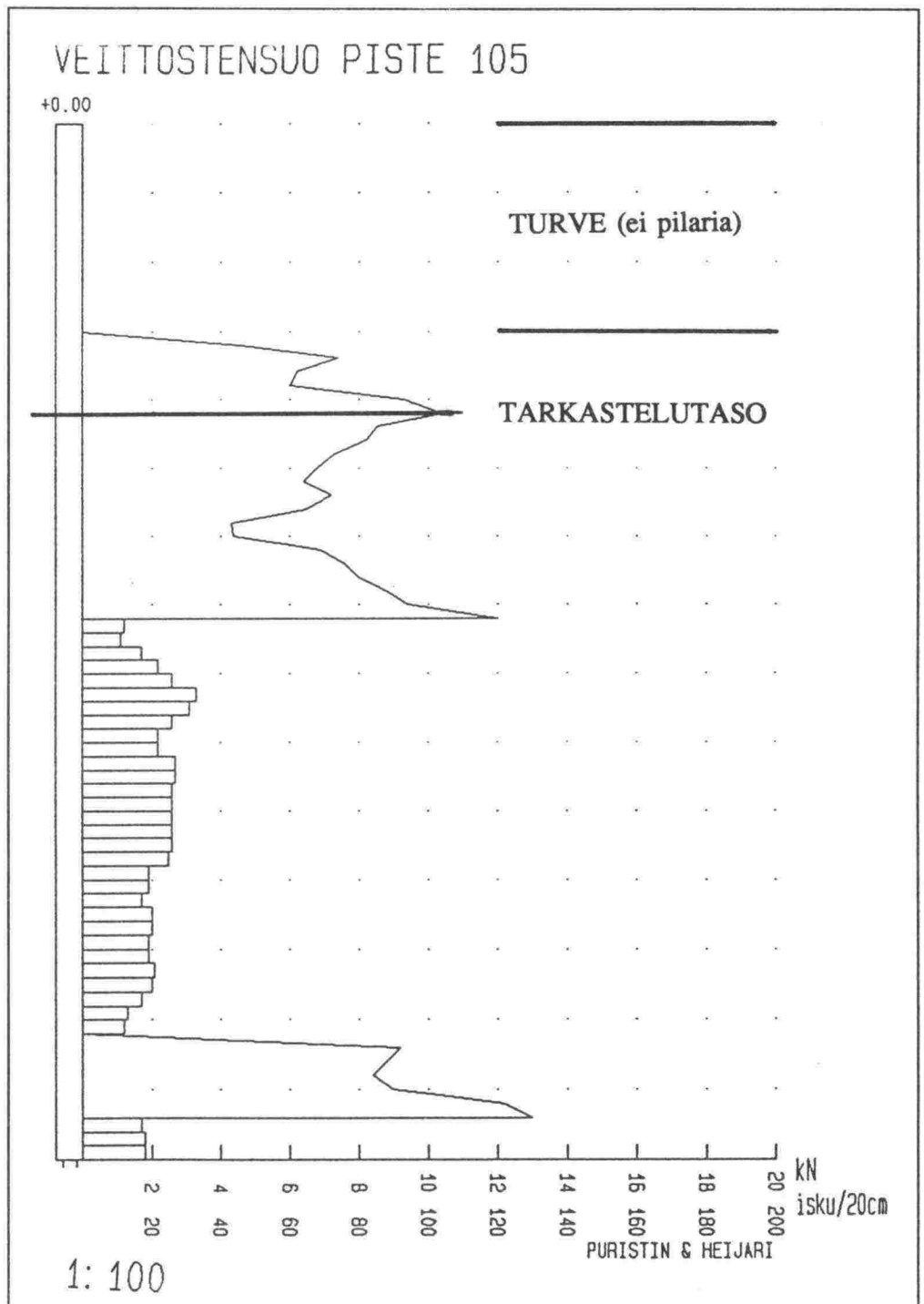
A kairan puristuspinta-ala = 0.01 m²

k kantavuuskerroin (0.08...0.16)

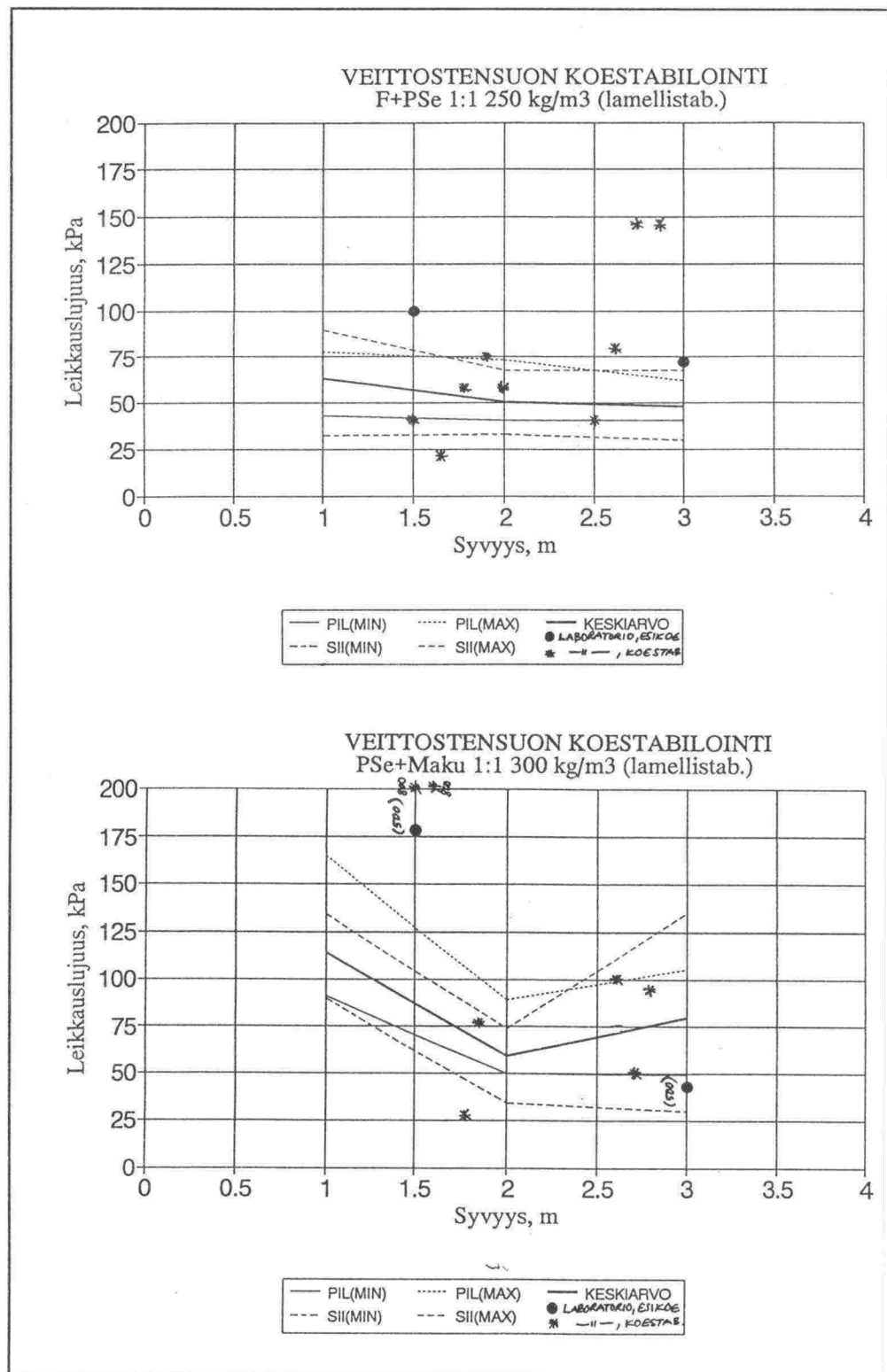
Esimerkiksi noin syvyydellä 4 m saadaan kuvassa esitetyn pilarin leikkauslujuudeksi:

$$\tau_p = k \cdot (p / A) = 0,12 \cdot (10,4 \text{ kN} / 0,01 \text{ m}^2) = 124,8 \text{ kN/m}^2$$

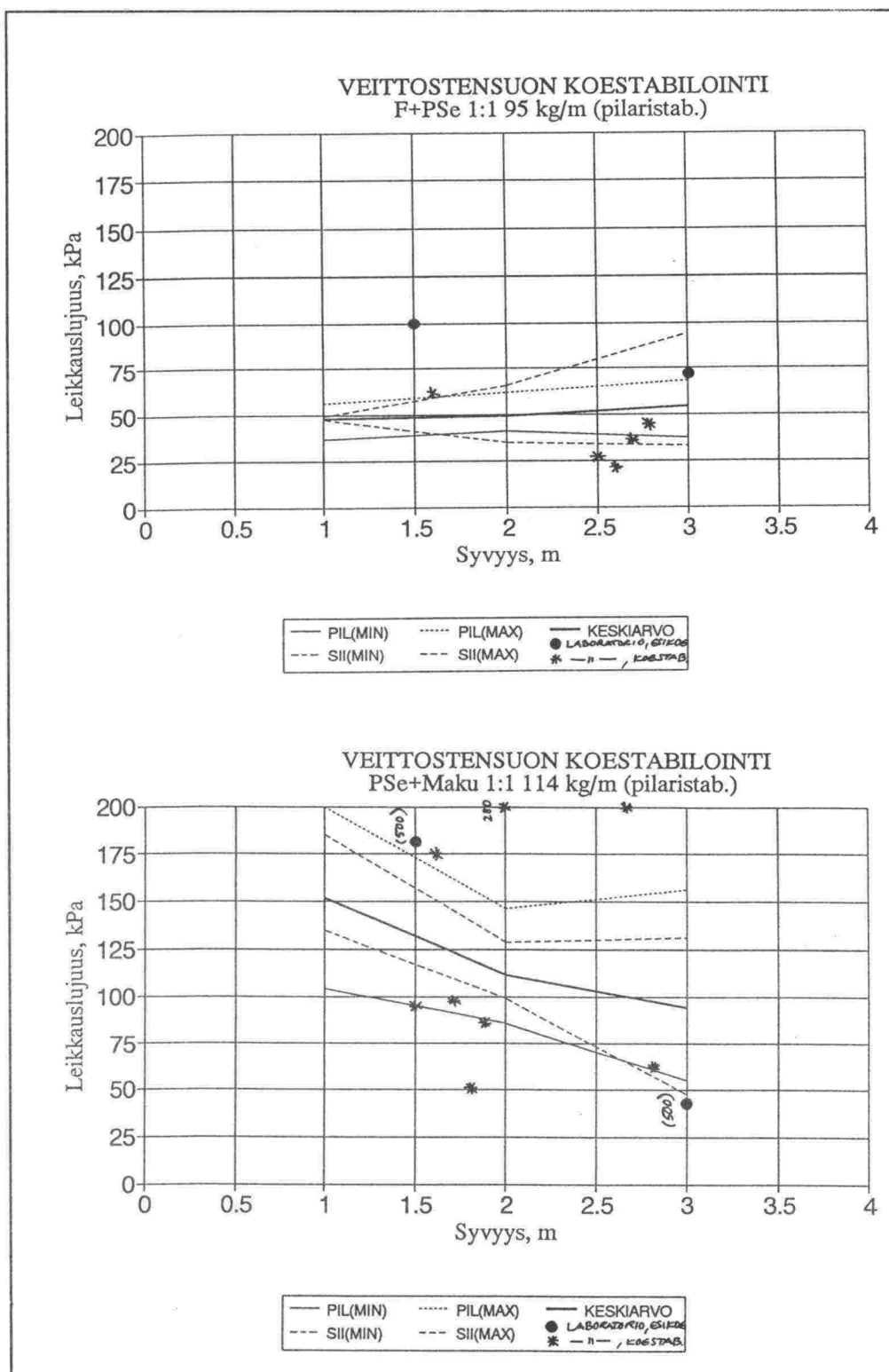
Finnstabilla ja pikasementillä stabiloidun turpeen keskimääräinen leikkauslujuus on vaihdellut lamellistabiloidulla osuudella 45-70 kPa ja pilaristabiloidulla osuudella 45-55 kPa. Pikasementin ja masuunikuonan seoksella stabiloidun turpeen keskimääräinen leikkauslujuus on vaihdellut lamellistabiloidulla osuudella 60-115 kPa ja pilaristabiloidulla osuudella 90-150 kPa. Alhaisimmillaan mitatut leikkauslujuudet ovat olleet noin 30 kPa molemmilla sideaineyhdistelmillä. Kairauksilla mitatut lujuudet vastaavat hyvin laboratoriossa saatuja arvoja (kuva 39).



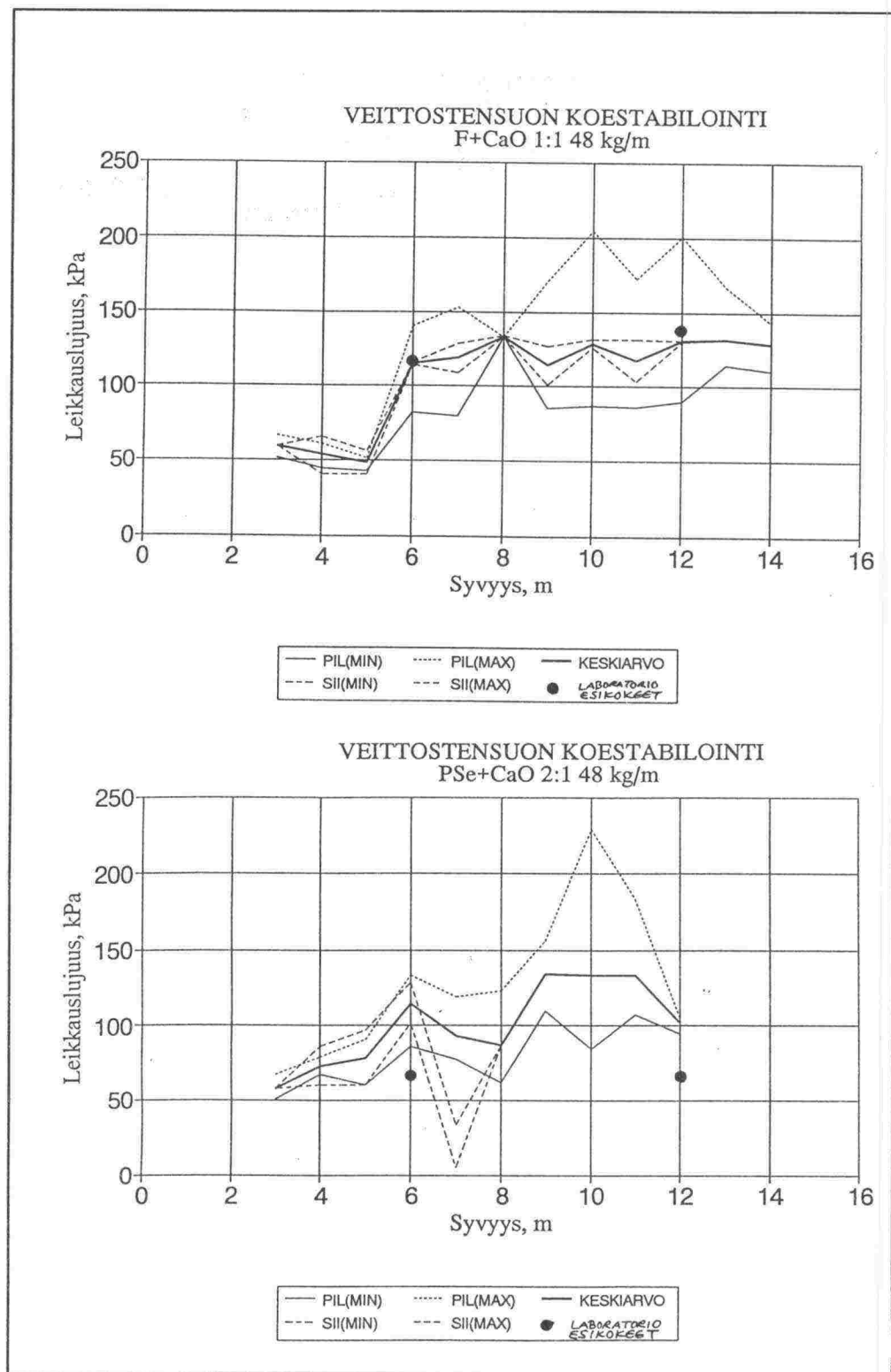
Kuva 38. Pilarikairausdiagrammi ja esimerkki tulkinnasta



Kuva 39. a) Stabiloidun turpeen kairaustulokset, lamellistabilointi.



Kuva 39. b) Stabiloidun turpeen kairaustulokset, pilaristabilointi.



Kuva 40. Stabiloidun saven kairaustulokset

Finnstabiilla ja kalkilla stabiloidun saven keskimääräiseksi leikkauslujuudeksi saatiin noin 120 kPa. Pikasementin ja kalkin seoksella stabiloidun saven keskimääräinen leikkauslujuus on vaihdellut 90-140 kPa. Molemmilla sideaineyhdistelmillä voidaan havaita välittömästi turpeen alapuolella (syvyys noin 3-5 m) heikommin lujittunut kerros, jossa keskimääräinen leikkauslujuus on vaihdellut 50-80 kPa (kuva 40).

5.2.3 Sideainetutkimukset

Työmaalta otettiin stabilointityön aikana sideainenäytteitä ja työn jälkeen stabiloituja turvenäytteitä sideaineen syötön tasaisuuden, sekoittumisen tehokkuuden sekä lujittumisen tarkkailua varten.

Sideaineseoksille tehtiin sideaineselvitykset niin, että seoksen osakomponenttien määrät saatiin selvitettyä. Stabiloiduille näytteille tehtiin sideainemäärä- ja lujuusselvitykset. Tutkittavat turvenäytteet oli otettu kahdessa vaiheessa: välittömästi työn tekemisen jälkeen ja noin 30 vrk lujittumisajan jälkeen.

Sideainenäytteet

Tutkittavat sideaineseokset olivat koerakennuskohteessa käytetyt seokset:

Finnstabi+CaO 1:1
Finnstabi+pikasementti 1:1
Pikasementti+CaO 2:1
Pikasementti+masuunikuona 1:1

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää seossuhteet käyttäen määritykseen vertailumateriaaleina seokseen käytettyjä osakomponentteja (pikasementti, CaO, Finnstabi ja granuloitu ja jauhamaton masuunikuona).

Sideainemääritykset tehtiin British Standards BS 1924:1976 mukaisesti. Standardi perustuu kalsiumpitoisuuden (Ca) määrittämiseen. Määrityksiä tehtiin 2 kpl/sideaineseos. Määritysten perusteella lasketut seosten osakomponenttien määrät on esitetty taulukossa 18.

Taulukko 18. Seosten osakomponenttien määrät.

Tutkittava seos	Seoksen osakomponenttien määrät prosentteina			
	F	CaO	PSe	Maku
F+CaO	51%	49%	-	-
F+PSe	44%	-	56%	-
PSe+CaO	ei tulosta	ei tulosta	-	-
PSe+Maku	-	-	54%	46%

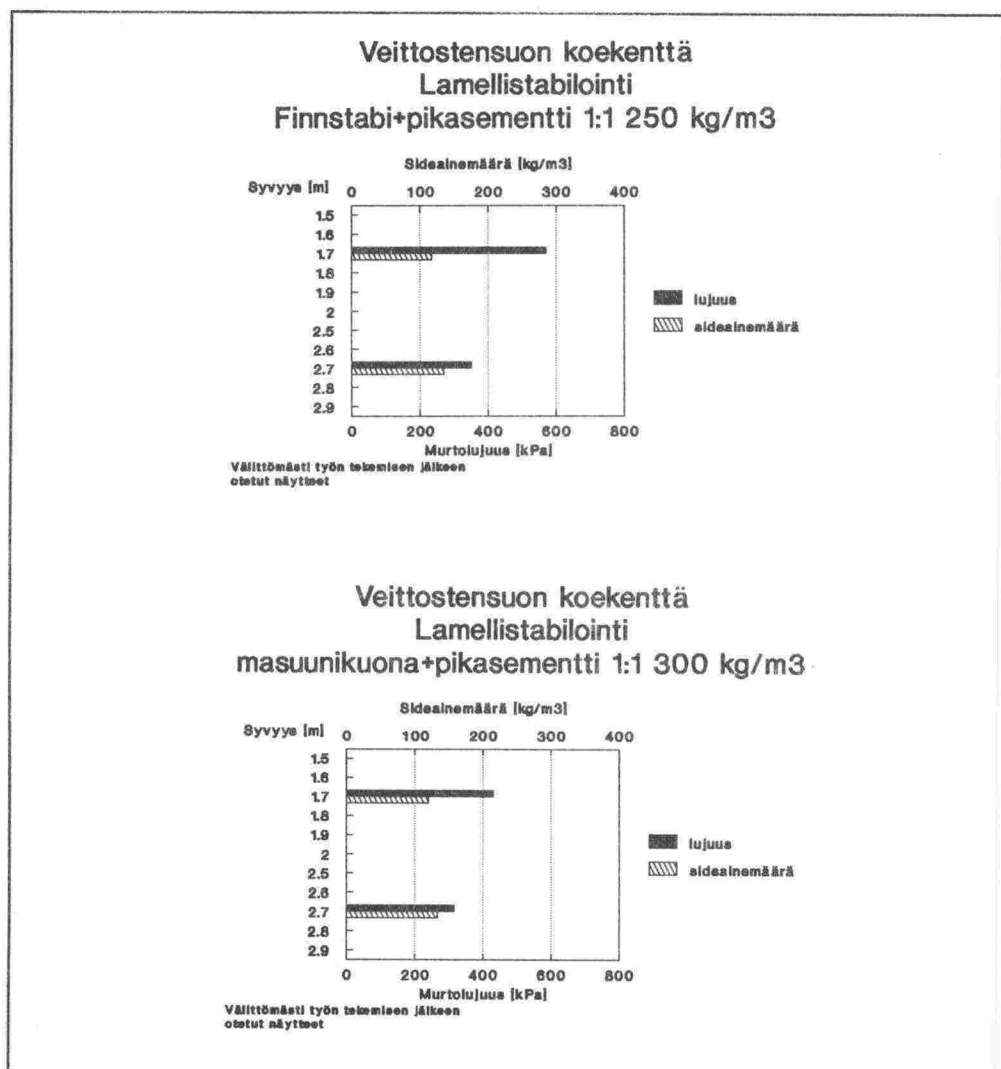
F Finnstabi
Maku granuloitu ja jauhamaton masuunikuona
PSe pikasementti

Pikasementti+CaO-seoksen osakomponenttien määrittäminen ei onnistunut, vaikka määritykset toistettiin ja tulokset tarkistettiin. Seoksen väri muistutti Finnstabi+CaO-seoksen väriä (kellertävää), joten on todennäköistä, että seos oli muuta kuin seospussin päälle oli merkitty.

Muiden seosten osalta määritykset onnistuivat hyvin ja saadut sideainemäärät vaihtelivat välillä 44 %-56 %, mitä voidaan pitää varsin hyväksyttävänä hajontana.

Työvaiheessa otetut näytteet

Stabilointityön aikana otettiin stabiloidusta turpeesta näytteitä, joille tehtiin sideaineselvitykset samalla periaatteella kuin sideaineseoksille. Sideainemääritysten tulokset on esitetty kuvassa 41.

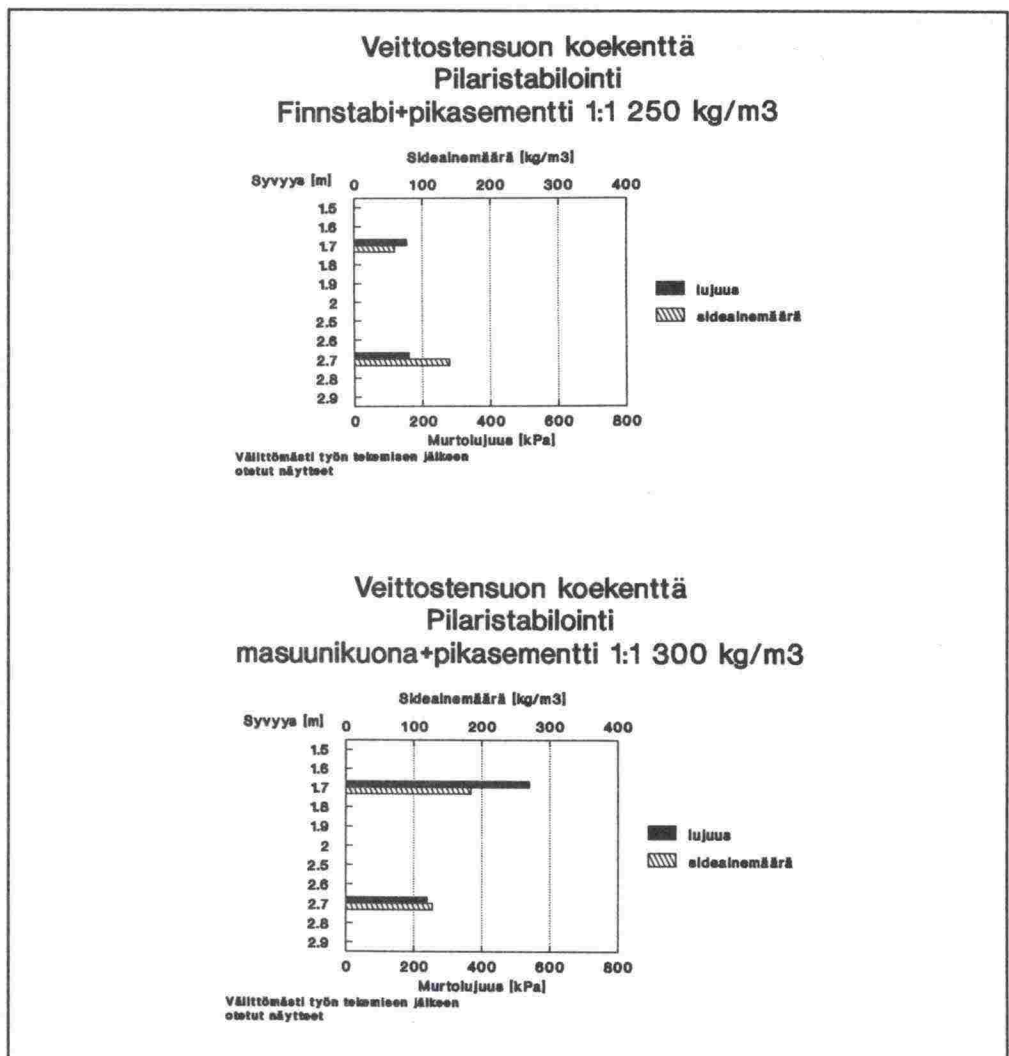


Kuva 41. a) Näytteiden sideainemääritysten ja lujuuskokeiden tulokset, lamellistabilointi.

Tuloksista nähdään, että sideainemäärät jäivät selvästi alle asetettujen määrien. Tämä johtuu osin siitä, että sideaine on turvenäytteessä jakautunut turpeen huokostilaan sementtikiveksi eikä sekoittunut turpeeseen tasaisesti. Näin ollen tutkimusnäytteessä (10 gramman näyte) olevat turpeen osat pienentävät sideainemäärää oleellisesti. Tämän vuoksi sideainemäärittäminen tuloksia ei voida pitää absoluuttisesti luotettavina, mutta ne kuvaavat hyvin sideaineen suhteellista jakaumaa tarkasteltavalla syvyysvälillä.

Välittömästi työn tekemisen jälkeen otetuille näytteille tehtiin myös lujuuskokeet. Näytteet olivat samoja näytteitä, joille tehtiin sideainemäärittäykset. Lujuustulokset on esitetty myös kuvassa 41.

Tuloksista nähdään, että alhaisista sideainemääristä huolimatta näytteet ovat lujittuneet varsin hyvin. Murtolujuudet vaihtelevat välillä 150-400 kPa.



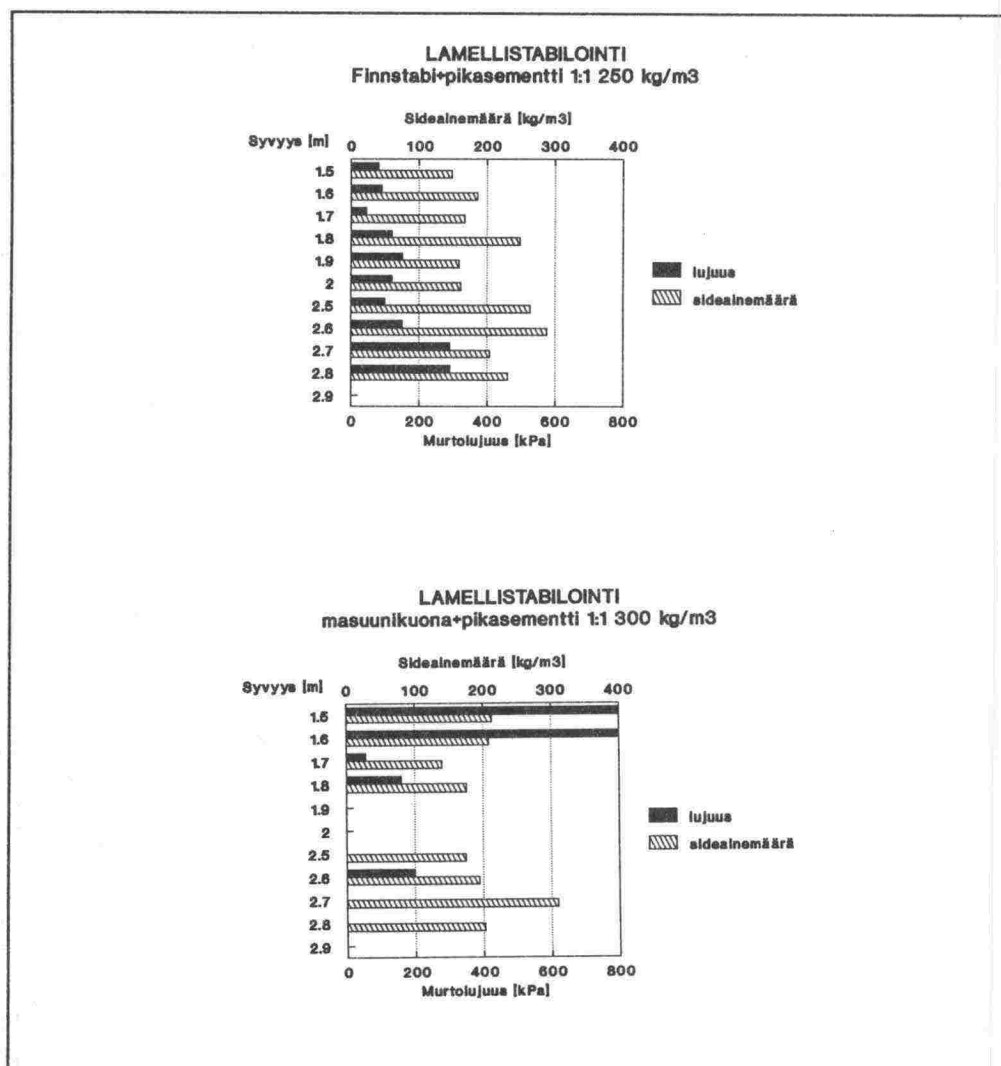
Kuva 41. b) Näytteiden sideainemäärittäysten ja lujuuskokeiden tulokset, pilaristabilointi.

30 vrk näytteet

Sideaineanalyysit tehtiin kuukauden ikäisille stabiloiduille näytteille kuten edellisessä kohdassa. Näytteiden esikäsittelyä muutettiin kuitenkin niin, että tulokset saatiin vastaamaan paremmin todellista tilannetta: lujuuskokeissa puristetut näytteet kuivattiin uunissa, minkä jälkeen näytteet jauhettiin. Tämän jälkeen jauhetut ja kuivat näytteet seulottiin # 1 mm seulan läpi ja seulonnan yhteydessä poistettiin ne puun ja kantojen palaset, jotka eivät kunnolla jauhautuneet ja läpäisseet seulaa (erittäin vähäinen osa näytemääristä). Näin tutkittavat näytteet saatiin kohtalaisen homogeenisiksi ja tutkimustulokset siten tarkemmiksi.

Tulokset on esitetty kuvassa 42. Kuvassa on esitetty myös vastaavien näytteiden lujuustulokset.

Sideainemäärissä on jonkin verran vaihtelua, mutta keskimäärin sideainemäärät ovat Finnstabi+pikaseementti-seoksilla stabiloiduilla näytteillä 140-290 kg/m³

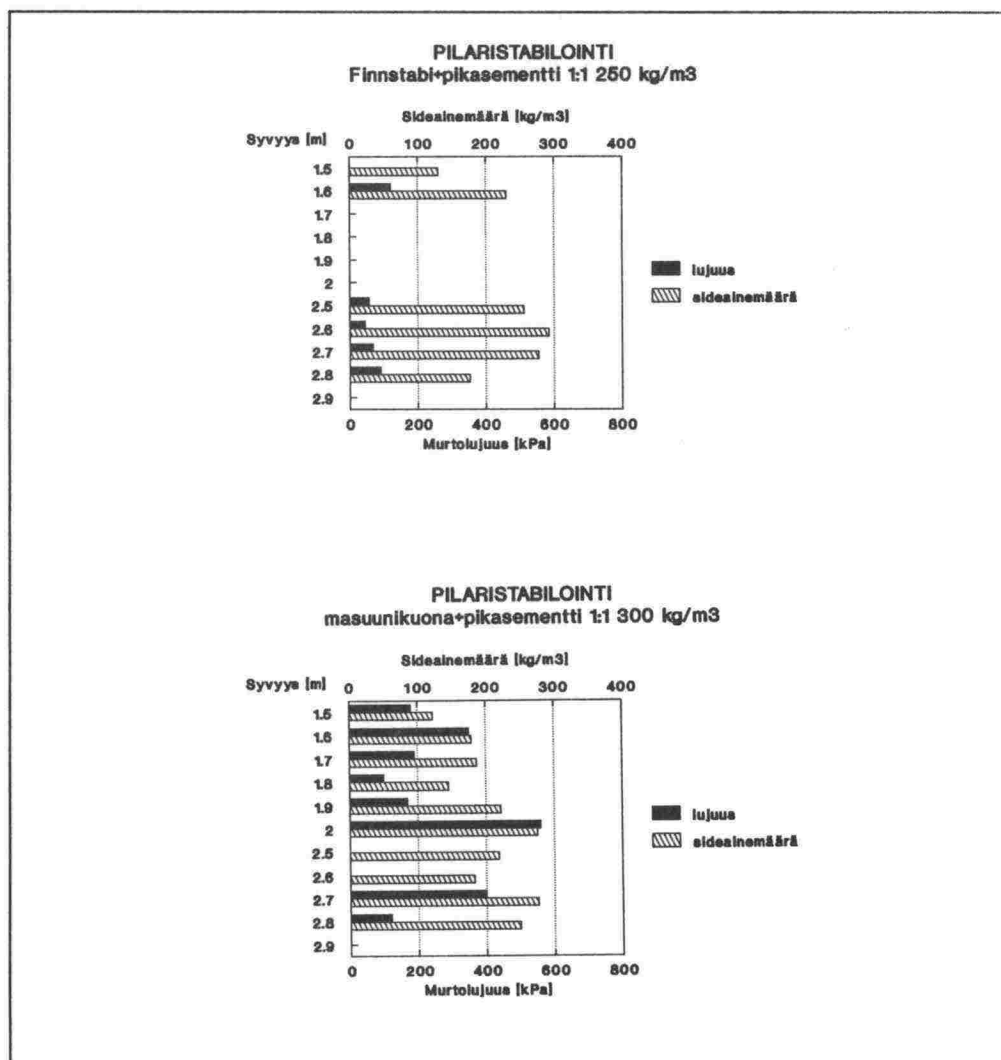


Kuva 42. a) Näytteiden sideainemääritysten ja lujuuskokeiden tulokset, lamelli-stabilointi.

(asetettu määrä: 250 kg/m³) ja masuunikuona+pikaseementti-seoksilla stabiloiduilla näytteillä 120-310 kg/m³ (asetettu määrä: 300 kg/m³).

Näytteiden lujuustulokset vaihtelevat syvyyden ja stabilointikentän mukaan. Finnstabi+pikaseementti-seoksella stabiloitujen näytteiden lujuudet pilaristabiloidulta kentältä ovat jääneet varsin alhaisiksi (50-120 kPa), vaikka sideainemäärät ovat korkeat (180-290 kg/m³). Tulosten erilaisuus saattaa hyvin johtua näytteiden pienestä koosta (D x H = 55 mm x 170 mm), jolloin pienetkin sideaineen syötön epätasaisuudet (esim. sideaineen kerroksellisuus varsinkin pilaristabiloinnissa) vaikuttavat näytteen lujuuteen, vaikka sideainetta näyte-kappaleessa olisikin keskimäärin asetusten mukainen määrä.

Masuunikuona+pikaseementti-seoksella stabiloitujen näytteiden lujuudet korreloivat paremmin sideainemäärien kanssa. Kun sideainetta on näytteessä ollut noin 200 kg/m³ mukainen määrä, ovat lujuudet olleet korkeita (keskimäärin 400-800 kPa). Yleisesti voidaan todeta, että murtolujuudet ovat jääneet alle tason 100 kPa, kun sideainetta näytteessä on ollut alle 150 kg/m³.



Kuva 42. b) Näytteiden sideainemääritysten ja lujuuskokeiden tulokset, pilaristabilointi.

Suuriin lujuusvaihteluihin vaikuttaa myös käytetty näytteenottotapa. Näytteenottimen pienestä halkaisijasta ($\varnothing = 50$ mm) johtuen osassa näytteitä olikin silmämääräisesti havaittavia murtohalkeamia pinnassa, jotka ulottuvat mahdollisesti syvemmälle näytteeseen.

Maasto- ja laboratoriotutkimustulosten perusteella voidaan yhteenvetona todeta, että koerakenne on täyttänyt lyhytaikaisessa seurannassa sille asetetut vaatimukset. Mitoituksessa käytetyt lujuusarvot vastaavat hyvin koerakenteesta mitattuja arvoja ja painumat ovat olleet suuruusluokaltaan laskelmien mukaisia.

Mikroskooppikuvat

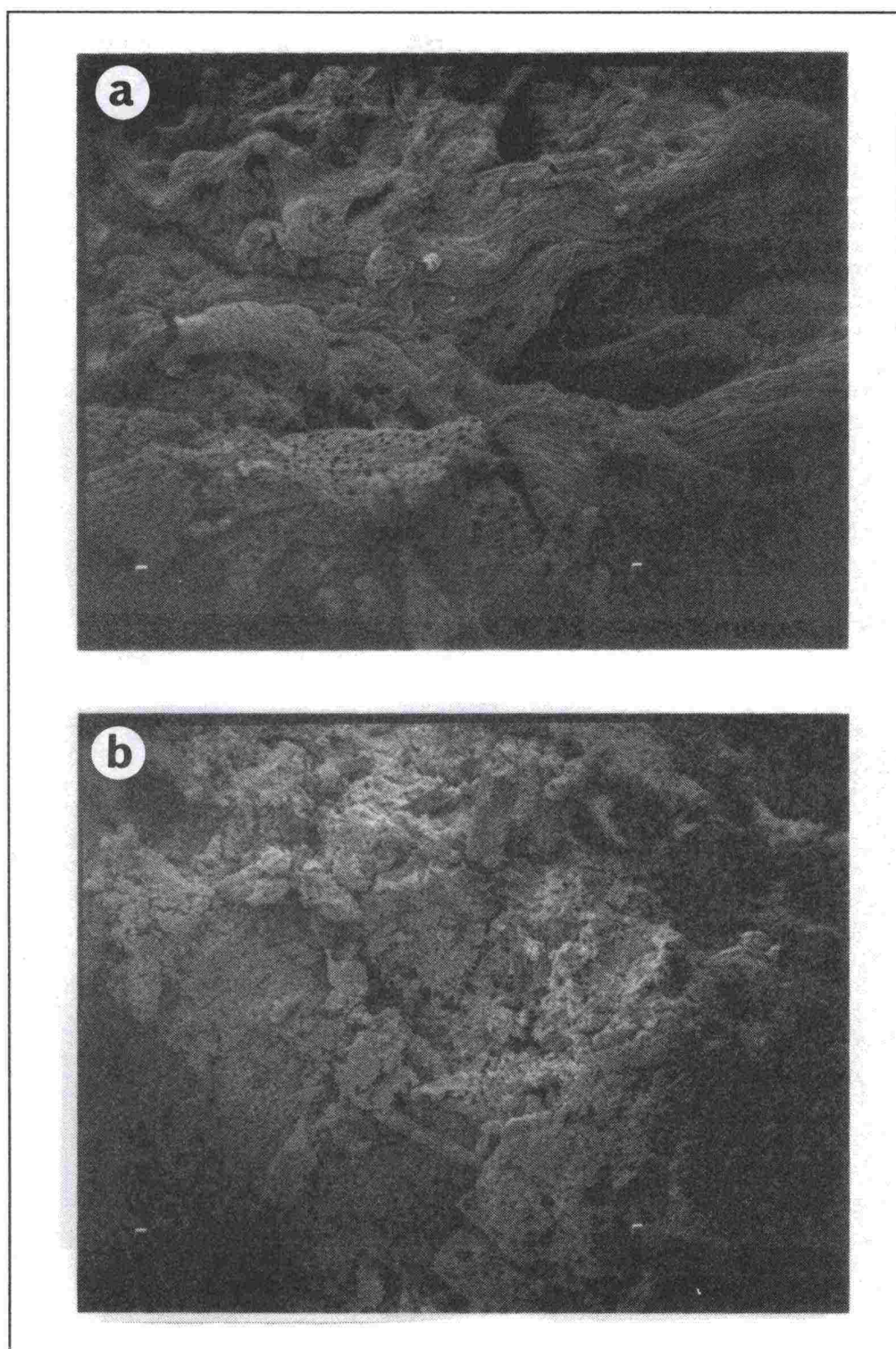
Kentältä otetuista muutamasta näytteestä otettiin mikroskooppikuvat lujitusreaktioiden tarkempaa selvitystä varten. Kuvauksiin valittiin neljä stabiloitua näytettä. Kaksi näytteistä oli stabiloitu Finnstabi+pikasementti-seoksella ja kaksi masuunikuona+pikasementti-seoksella. Lisäksi näytteet oli valittu niin, että toinen näytteistä on hyvin lujittunut ja toinen heikosti lujittunut.

Stabiloitujen näytteiden lisäksi kuvattiin yksi stabiloimaton turvenäyte, jotta mahdolliset muutokset materiaaleissa voitiin paremmin arvioida. Kuvissa 43-45 on esimerkkejä sekä stabiloimattoman että stabiloidun turpeen mikroskooppikuvista.

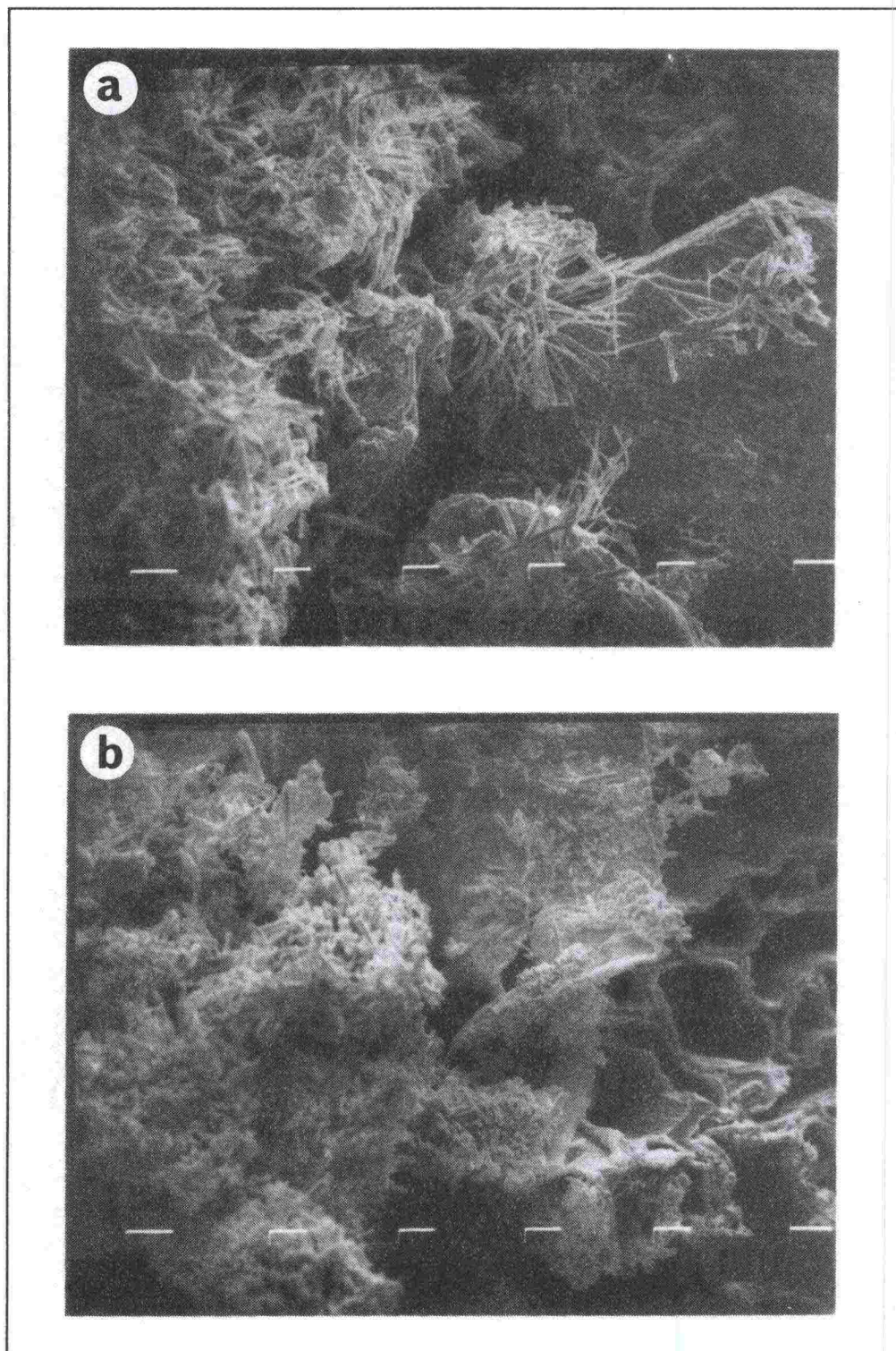
Kuvassa 43 olevasta 75-kertaisista suurennoksista nähdään, että stabiloidussa näytteessä on sideaineseoksesta muodostuva massa turpeen pinnalla, eikä turpeen syinen rakenne enää erotu.

Kuvassa 44a, missä sideaineena on käytetty pikasementin ja masuunikuonan seosta, voidaan havaita sementin hydratoitumisesta johtuvia piikkejä näytteessä. Levymäiset partikkelit ovat granuloidun masuunikuonan kappaleita. Finnstabin ja pikasementin seoksella stabiloidun näytteen materiaali (kuva 44b) on massamaista. Näytteessä voidaan havaita paksuja, tiheään ryhmittyneitä ettringiitti-piikkejä. Kuvan 44b yläreunassa nähdään turpeen onkaloita.

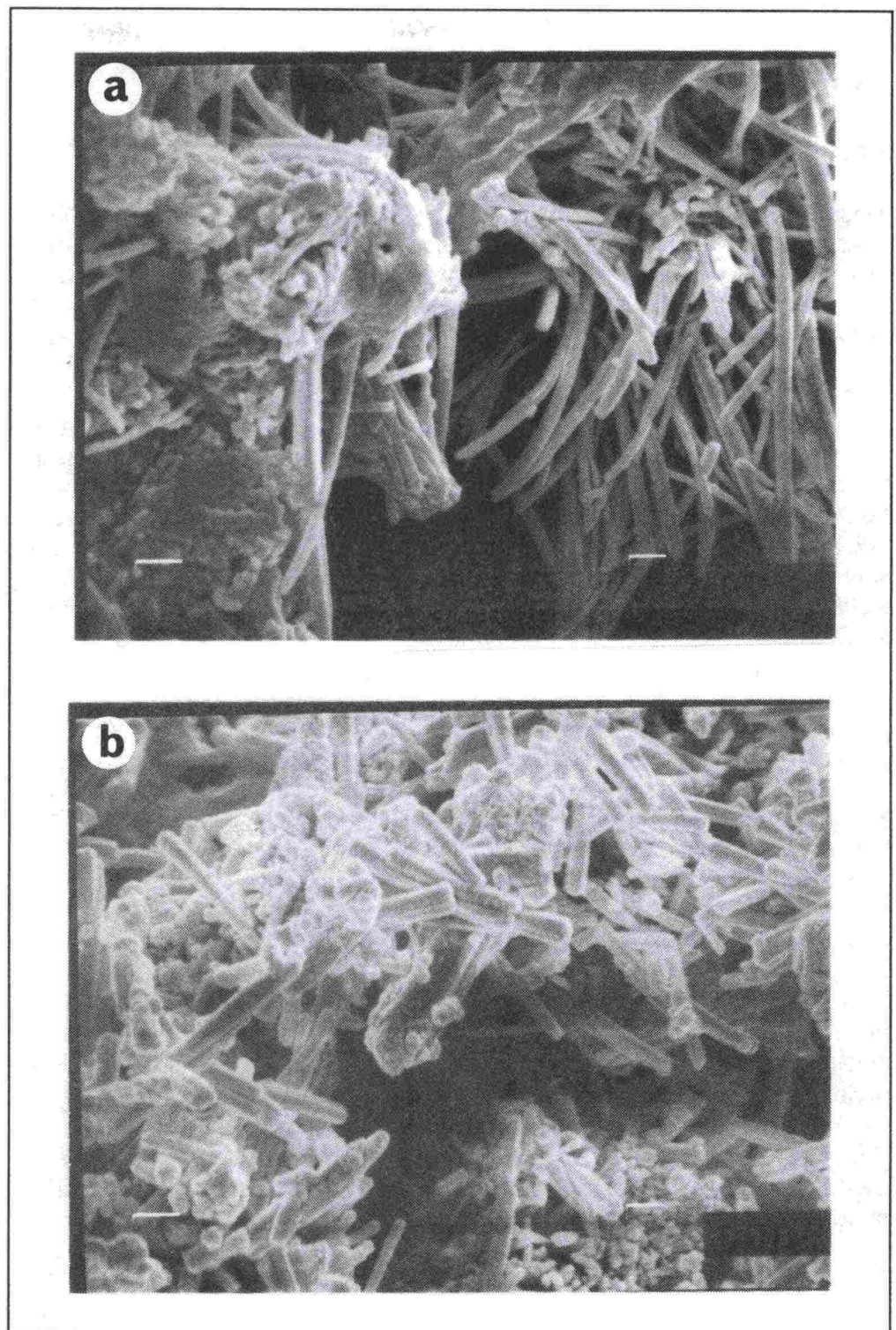
Kuvassa 45 olevasta 7500-kertaisista suurennoksista nähdään selvästi erot sementin hydratoitumisesta aiheutuvien sementtimineraalien ja ettringiitin välillä. Ettringiitin mikrorakenne (kuva 45b) on selvästi sekoittuneempi kuin sementtimineraalien (kuva 45a), joiden rakenne on suuntautuneempi.



Kuva 43. a) Stabiloimattoman turpeen rakenne (suurennos 75x). b) Seoksella pikasementti+masuunikuona stabiloidun turpeen rakenne (75x).



Kuva 44. a) Seoksella pikasementti+masuunikuona stabiloidun turpeen rakenne (2000x). b) Seoksella Finnstabi+pikasementti stabiloidun turpeen rakenne (2000x).



Kuva 45. a) Seoksella PSe+Maku stabiloitu turve (7500x). b) Seoksella F+PSe stabiloitu turve (7500x).

6 SYVÄSTABILOINNIN KILPAILUKYKY

6.1 Stabilointivaihtoehtojen kustannukset

Tiesuunnitelmavaiheen kustannusarvio

Tiesuunnitelmassa päädyttiin esittämään jatkotarkasteluja varten soveltuvimmiksi pohjanvahvistusmenetelmiksi Veittostensuon ylittämiseen pohjaantäyttöä ja syvästabilointia. Tarkastelujen perusteina käytettiin menetelmien alueellista soveltuvuutta, työtekniikkaa, ympäristökysymyksiä, massataloutta sekä menetelmään liittyviä epävarmuustekijöitä.

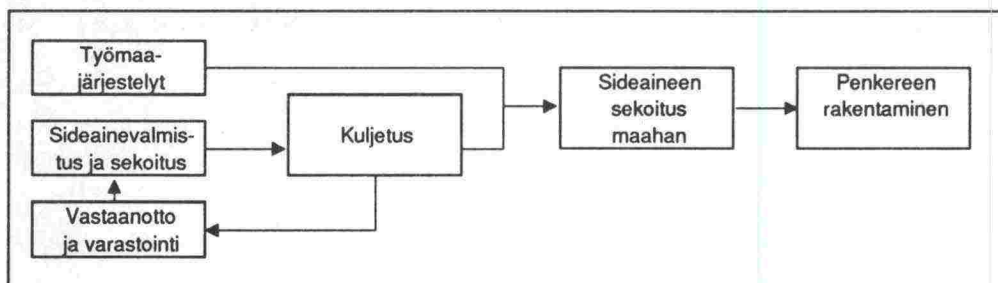
Pohjaantäyttö on syvyytensä ja laajuutensa puolesta geoteknisesti hyvin vaativa, mutta teknisesti toteutuskelpoinen menetelmä Veittostensuon ylittämisessä. Pohjaantäytön kilpailukyky riippuu oleellisesti täyttömassojen saatavuudesta ja läjitysalueiden sijainnista. Veittostensuon tapauksessa pohjaantäyttömassoja on saatavissa läheiseltä kallioalueelta ja louhittua kallioaluetta voidaan käyttää myös ylösnousseiden massojen läjitysalueena. Kallioalueen sijainti suon läheisyydessä mahdollistaa kuljetukset työmaateitä käyttäen. Pohjaantäytön riskit liittyvät suunnitellun pohjaantäyttötason saavuttamiseen sekä ympäristökysymyksiin. Pohjaantäytön kokonaiskustannuksiksi arvioitiin 25.4 milj.mk.

Syvästabiloinnin käyttömahdollisuuksia koko Veittostensuon pohjanvahvistusratkaisuna vaikeuttavat paksut turve- ja liejukerrokset, joiden stabiloinnista ei ollut tiesuunnitelmavaiheessa aikaisempia kokemuksia. Syvästabiloinnin kokonaiskustannuksiksi arvioitiin tiesuunnitelman mukaisella tasauksella n. 33 milj.mk. Syvästabilointiratkaisun kilpailukykyä voidaan parantaa merkittävästi laskemalla tien tasausta.

Stabilointiratkaisun kustannukset koerakenteen perusteella

Tiesuunnitteluvaiheen stabilointikustannukset arvioitiin uudelleen tutkimustulosten perusteella. Uusi kustannusarvio perustuu sekä sideainetoimittajien ilmoittamiin ohjehintoihin että koekohteen rakentaneen YIT-Yhtymä Oy:n arvioimiin työn toteutuksen yksikköhintoihin.

Kokonaiskustannukset muodostuvat sideainetoimituksista, stabilointityöstä ja penkereen rakentamisesta (kuva 46). Työvaiheiden kustannukset sisältävät materiaali-, työ- ja yhteiskustannukset.



Kuva 46. Stabilointikustannusten osatekijät.

Lähtötiedot

Kustannusarvio laskettiin rakenneratkaisulla, jossa turve lujitettiin lamellistabiloinnilla ja savi pilaristabiloinnilla. Stabilointikohteen pituus 1,2 km (plv:llä 37400 - 38600). Leveys 16,5 m (yksi ajorata). Pilarit k/k 1,5 m.

Sideaineiden laskentahetken ovh-hinnat vapaasti tehtaalla:

- Finnstabi	365 mk/ton
- CaO	560 mk/ton
- Pikasementti	420 mk/ton
- Masuunikuona (jauhettu)	100 mk/ton

Sideainekustannukset

- pilarit savessa Ø 700 mm k/k 1,5 m L = 15 pilarimäärä 132 000 pil-m sideaine F + CaO 1:1 48 kg/m tai sideaine PSe + CaO 2:1 48 kg/m	5,2 milj.mk 5,2 milj.mk
- lamellistabilointi turpeessa H = 3 m lamellimäärä 59 000 m³ sideaine F + PSe 1:1 250 kg/m³ tai sideaine PSe + Maku 1:1 300 kg/m³	10,3 milj.mk 8,8 milj.mk

Pilari- ja lamellityön kustannukset 7,7 milj.mk

Pengerrakenteen kustannukset: 2,4 milj.mk

Kokonaiskustannukset 24,1 - 25,6 milj.mk

6.2 Stabiloinnin ja massanvaihdon kustannusvertailu

Kustannuslaskelman perusteella voidaan todeta, että pohjaantäytön ja syvästabiloidun ratkaisun kustannukset ovat koerakenteen perusteella samaa suuruusluokkaa. Syvästabiloidun ratkaisun kustannuksia on mahdollista alen-
taa edelleen sideainemääriä vähentämällä, sillä sideainekustannusten osuus kokonaiskustannuksista on edellä esitetyn laskelman mukaan noin 60 %. Jos sideainemäärää voidaan vähentää sekä savessa että turpeessa 20 % ilman merkittävää lujuuden pienenemistä, niin tällöin syvästabiloidun ratkaisun kustannuksiksi saadaan 21.1-22.5 milj.mk.

Jatkosuunnittelun yhteydessä on pohjaantäyttöä ja syvästabilointiratkaisua vertailtaessa arvioitava myös ympäristövaikutuksia. Pohjaantäytön osalta keskeiset ympäristöriskit liittyvät turpeen ja saven poiskaivuun, kuljetukseen ja läjitykseen sekä kiviaineksen ottoon. Myös pohjaantäyttötyön aikana syntyy haittoja ympäristölle. Valmis pohjaantäyttöpenger muodostaa veden virtaus-
olosuhteet muuttavan rakenteen suon keskelle.

Stabilointiratkaisussa keskeinen ympäristökysymys on käytettävistä side-
aineista mahdollisesti liukenevat ympäristön kannalta haitalliset aineet. Myös stabiloitu turve muodostaa suon poikki kulkevan vettäläpäisemättömän raken-
teen, joka muuttaa suon luonnontilaista pohjavesien virtaustilaa.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Rantsilan ja Veittostensuon koekohteissa tehty tutkimus- ja kehitystyö on edistänyt merkittävästi turpeen stabilointiteknologiaa. Veittostensuon koekohteen tulokset osoittavat, että turpeen stabilointi on sekä teknisesti että taloudellisesti kilpailukykyinen vaihtoehto. Tämänhetkisen tutkimustiedon perusteella turpeen stabiloinnin kustannukset ovat Veittostensuon kohteessa samaa suuruusluokkaa kuin perinteisen ratkaisun pohjaantäytön kustannukset.

Häiriintymättömän näytteenotto turpeesta on hankalaa johtuen turpeen epähomogeenisesta rakenteesta. Näytekoon täytyy olla riittävän suuri, jotta saadaa edustava otos turpeen rakenteesta. Veittostensuolla käytettiin erityisesti turpeen näytteenottoon soveltuvaa suuriläpimittaista näytteenotinta, jossa on ylösnoston aikana sulkeutuvat näytteen ulosvalumisen estävät sormisulkijat. Ongelman näytteenotossa ja näytteiden säilytyksessä muodostaa myös näytteen vesipitoisuudessa tapahtuvat muutokset.

Maatutkaluotaus on turvekerrosten tutkimuksiin hyvin soveltuva menetelmä. Maatutkaluotauksen perusteella voidaan erottaa raakaturpeen- ja maatuneen turpeen kerrostumat. Luotaus antaa lisäksi paremman kuvan turvekerrosten paksuudesta ja vaihteluista kuin pelkät kairaukset. Turpeen ja saven rajapinta on maatutkakuvissa hyvin selvä, kun taas rajapinnan selvittäminen tavanomaisilla kairauksilla voi olla hankalaa.

Laboratoriossa tehtyjen stabiloituvuuskokeiden tulosten perusteella voidaan todeta, että sekä turpeen että saven stabilointiin on mahdollista löytää riittävän edulliset sideainelaadut ja -määrät. Teknisesti mahdollisia sideainevaihtoehtoja löydettiin useita. Parhaat laboratoriotulokset turpeen stabiloinnissa saatiin pikasementillä, johon oli lisätty joko Finnstabiä tai masuunikuonaa seossuhteen ollessa 1:1. Saadut tutkimustulokset ovat merkittäviä turpeen stabilointiin soveltuvien sideaineiden jatkokehitystyölle.

Veittostensuon savikerrosten stabiloituvuus tutkittiin monipuolisesti. Erot eri sideaineiden välillä olivat merkittävän suuret. Parhaat laboratoriotulokset saatiin tämän tutkimuksen yhteydessä Finnstabin ja kalkin seoksella kaikissa tutkituissa savikerroksissa. Myös maastossa Finnstabin ja kalkin seos lujittui jonkin verran paremmin ja tasaisemmin kuin pikasementin ja kalkin seos.

Turpeen stabilointia varten kehitettiin menetelmä, jossa on yhdistetty stabilointi ja tiivistystekniikka. Laboratoriotutkimukset pyrittiin tekemään maastoa vastaavissa olosuhteissa sekä rakentamisessa toteutuvia vaiheita ja kuormituksia simuloiden.

Koerakenne toteutettiin turpeen osalta uudella massastabilointimenetelmällä ja -kalustolla, jossa turpeeseen tehtiin lamelleja tavanomaisten pilareiden sijasta. Osalla koepenkereen aluetta turve stabiloitiin pilarointina. Lyhytaikaisen seurannan perusteella voidaan arvioida, että koerakenne on täyttännyt hyvin sille asetetut vaatimukset.

Pilareiden ja lamellien lujittuminen on tapahtunut 30 vrk kairaustulosten ja laboratoriotutkimustulosten perusteella suunnitellun mukaisesti. Sideainemäärissä ja lujuuksissa on havaittu jonkin verran hajontaa etenkin turpeen osalla. Vaihtelut johtuvat ainakin osittain massastabiloinnin sekoituksen epätasaisuudesta, joka puolestaan johtuu osittain turvemateriaalin epähomogeenisesta rakenteesta. Lamellistabiloinnilla on kuitenkin saavutettu homogeenisempi lopputulos kuin pilaristabiloinnilla. Laboratoriossa esikokeilla määritetyt lujuudet ovat olleet jonkin verran suurempia kuin maastosta mitatut arvot. Lujuuksissa havaitut erot voidaan selittää laboratoriomittakaavassa tehtyjen koekappaleiden tasaisemmalla laadulla.

Häiriintymättömän näytteen otto stabiloidusta turvekentästä osoittautui myös ongelmalliseksi. Koerakenteesta otettiin näytteet sekä välittömästi tiivistyspenkereen rakentamisen jälkeen että 30 vrk lujittumisajan jälkeen. Tulokset osoittavat, että ennen varsinaista lujittumista otetut näytteet ovat olleet ehjiä ja antavat esikokeita hyvin vastaavia tuloksia. Sen sijaan 30 vrk lujittumisen jälkeen porakoneella ja 65 mm näytteenottimella otetut näytteet ovat olleet osittain rikkonaisia, minkä seurauksena lujuustulokset olivat hyvin vaihtelevia.

Painumatarkkailutulokset osoittavat, että painumat ovat tapahtuneet nopeasti kuormituslisäyksen jälkeen sekä lamelli- että pilaristabiloidun koerakenteen alueella. Suurin osa painumista on tapahtunut stabiloidussa turpeessa. Pilaristabiloidun osuuden painumat ovat olleet noin kaksinkertaisia lamellistabiloituun alueeseen verrattuna. Painumaerot ovat jääneet pienemmiksi lamellistabiloidulla alueella. Saveen tehtyjen pilareiden painumat ovat olleet käytännössä merkityksettömän pieniä. Kokoonpuristuvuuskokeiden perusteella arvioidut koerakenteen painumat ovat vastanneet hyvin koerakenteesta havaittuja arvoja.

8 JATKOTUTKIMUSTARPEET

Veittostensuon koerakenteen seuranta on vielä kesken ja seurantaa tulisi jatkaa vielä ainakin 2-3 vuoden ajan. Mikäli mahdollista koerakenteen käyttäytymisen seurantaa tulisi jatkaa vielä tätäkin pidemmälle. Jatkoseurannan perusteella voidaan harkita mm. penkereen uudelleen korottamista.

Tämän tutkimuksen yhteydessä savessa olevia pilareita on tutkittu vain kairausten avulla. Pilarien lujuus ja homogeenisuus tulisi jatkossa tutkia myös näytteenoton ja laboratoriotutkimusten perusteella. Paras menetelmä olisi kokopilarinäytteenotto, josta otetaan palanäytteet laboratoriotutkimuksia varten. Suhteellinen tasalaatuisuus mitataan pilarin leikkauspinnasta maastossa.

Stabiloidusta turpeesta otetut näytteet ovat tähän mennessä olleet 30 vrk ikäisiä näytepaloja, joiden halkaisija on ollut 65 mm. Tämä on rajoittanut massan lujuuden ja sideainemäärän tasalaatuisuuden tutkimista. Eri turvekerroksista ja eri sideaineilla tehdyistä kohdista tulisi jatkossa ottaa riittävän suurikokoiset näytteet (mieluiten palanäytteitä), joista sideainejakauman ja lujuuden homogeenisuus saadaan perusteellisemmin tutkittua.

Turpeen stabilointimenetelmän teknisiä ja taloudellisia osa-alueita tulisi kehittää vielä merkittävästi. Turpeen stabiloinnin kustannuksia voidaan alentaa kehittämällä eri turvelaaduille soveltuvia tehokkaita sideaineita, jolloin sideainemääriä voidaan pienentää nykyisestä. Menetelmän jatkokehittämiseen kuuluu myös massastabilointilaitteiston kehitystyö teknisen laadun ja taloudellisuuden parantamiseksi.

Tämän tutkimuksen yhteydessä ei ole selvitetty stabiloidun turpeen pitkäaikaisominaisuuksia. Tämän vuoksi tulisi jatkossa selvittää mahdolliset fyysiset ja kemialliset muutosprosessit, jotka voivat vaikuttaa stabiloidun turpeen pitkän ajan ominaisuuksiin. Näin voidaan varmistua turpeen stabiloinnin teknisestä luotettavuudesta. Sekundääripainuman osuus ja merkitys stabiloidussa turpeessa tulisi myös selvittää pitkäaikaisilla muodonmuutoksokokeilla sekä Veittostensuon painumaseuranta jatkamalla. Jatkotutkimuksissa tulisi selvittää myös stabiloidun turpeen lämpötekniiset ja vedenjohtavuusominaisuudet.

Jatkotutkimusten tavoitteena tulisi olla stabiloidun turpeen mekaanisten ominaisuuksien tutkiminen ja stabilointimenetelmien kehittäminen siten, että tuloksena pystytään esittämään luotettavat mitoitus- ja työmenetelmät turpeen stabilointia varten.

9 KIRJALLISUUSLUETTELO

Ahonen Mika 1993. Stabiloidun turpeen mekaaniset ominaisuudet. Diplomityö. Oulun yliopisto, rakentamistekniikan osasto, geotekniikan laboratorio.

Broms B., Boman P. 1978. Stabilization of soil with lime columns. Design handbook. Department of Soil and Rock Mechanics Royal Institute of Technology.

GLO-85. Geotekniset laboratorio-ohjeet. 1. Luokituskokeet. Suomen Geoteknillinen Yhdistys r.y. Rakentajain Kustannus Oy.

Helenelund, K.V. 1967. Maarakennusmekaniikka. Otakustantamo 137.

Kalkkipilariohjeet KPO-86. Viatek Oy.

Koerakenteita turve- ja silttipehmeikölle, Esisuunnittelu, Vt 4 Rantsila. Tiehallituksen sisäisiä julkaisuja 39/1991.

Kogure et al. 1986. Physical and engineering properties of peat ground. Prog. Advances in Peatlands Engineering. Carleton University, Canada.

Syvästabilointiohje STO-91. Rakennusteollisuusyhdistys r.y. & Rakennustieto Oy. Helsinki 1992.

Vt 12 välillä Jokue - Tillola, Veittostensuon geotekniikka, Yleissuunnitelma. Viatek Tapiola Oy 26.2.1992.

Vt 12 välillä Jokue - Tillola, Veittostensuon geotekniikka, Yleissuunnitelma, Laboratoriotutkimukset. Viatek Tapiola Oy 26.2.1992.

TIEHALLITUKSEN SISÄISIÄ JULKAISUJA

- 5/1991 Massanvaihdon korvaaminen moreenitukiseinällä. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 6/1991 Havupuuhake pengertäytteenä. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 13/1991 Tieverkkojen asentaminen, käytännön ohjeita. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 16/1991 Asfalttimassan suhteitus Marshal-menetelmän mukaan. Geopalvelukeskus
- 17/1991 Murskeen muodonmuutosominaisuudet tien rakennekerroksissa. Geopalvelukeskus
- 23/1991 Betonipäälysteen seuranta; Raportti suunnittelusta ja rakentamisesta. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 32/1991 Moreenin käyttö tierakenteissa. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 39/1991 Koerakenteita turve- ja selttipehmeikölle. Geokeskus, Oulun kehitysyksikkö
- 20/1992 Vanhojen tienrakennekerrosten uudelleen käyttö. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 26/1992 Kalliomurskeiden käyttö sitomattomissa rekennekerroksissa, esiselvitys. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 42/1992 Pehmeikölle perustettavan tiepenkereen geotekniset laskelmat. Geopalvelukeskus
- 43/1992 Pehmeikölle rakennettavien tieleikkausten geotekniset laskelmat. Geopalvelukeskus
- 44/1992 Saven varaan perustetut alikulkukäytävät. Geopalvelukeskus

TIELAITOKSEN SISÄISIÄ JULKAISUJA

- 32/1993 V-poikkileikkaus ja teräsverkot tierakenteissa; Tulokset V-poikkileikkauksen ja teräsverkkojen käyttökokeista tien pituussuuntaisten halkeamien ehkäisyssä. TIEL 4000043
- 48/1993 Geopalveluiden maksu- ja mittausperusteet; Geopalveluyksiköiden tuloslaskelmat. TIEL 4000049

TIELAITOKSEN TUTKIMUKSIA

- 4/1992 Tiepenkereen holvautuminen, loppuraportti. TIEL 3100005

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 1/1992 Pystyajanauhojen laatuvaatimukset; laadunvalvonta ja testausmenetelmät. TIEL 3200057
- 31/1992 Pohjaveden maatiivistesuojan tiivistäminen. TIEL 3200086
- 46/1992 Syvästabiloinnin laadunvalvontaohje. TIEL 3200099
- 62/1992 Hienoaineksen vaikutus stabiloidun moreenimurskeen pakkauskäytävyyteen. TIEL 3200112
- 68/1992 Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelma (TPPT), perussuunnitelma. TIEL 3200118
- 69/1992 Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus. TIEL 3200119
- 78/1992 PTM-auton tuottamien tunnuslukujen käyttökelpoisuus ja vertailtavuus sekä niiden yhteys Laser-mittauksiin (IRI, IRI4, PI/Laser). TIEL 3200134

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 1/1993 Arktinen tienrakentaminen. TIEL 3200121
- 8/1993 Sitomattoman kantavan kerroksen rakentaminen. TIEL 3200135
- 15/1993 Masuunikuonan käyttö sitomattomissa päällysrakennekerroksissa. TIEL 3200142
- 16/1993 Betonipäällysteen seuranta; Vt 4 Kempele-Kiviniemi, seurantaraportti nro 1. TIEL 3200144
- 19/1993 Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskeva seurantatutkimus. TIEL 3200145
- 20/1993 Moreeni ja sen käyttö. TIEL 3200146
- 26/1993 Bentonitiittimattojen ja muovikavojen kelpoisuus pohjaveden suojaukseen, tutkimuksia ja suosituksia. TIEL 3200152
- 34/1993 Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen, esitutkimus. TIEL 3200159
- 36/1993 Palaturpeen käyttö lämmöneristeenä, raportti koerakenteiden rakentamisesta. TIEL 3200161
- 38/1993 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Kirjallisuusselvitys. TIEL 3200163
- 39/1993 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Esiselvitysvaiheen kuormituskokeet. TIEL 3200164
- 40/1993 Teiden tasaisuusmittareiden vertailu; PTM:n, Roadmanin ja Dipstickin laitevertailu sekä epätasaisuuksien vaikutus tierasitukseen. TIEL 3200165
- 41/1993 Stabiloidun materiaalin maksimiraekoon sekä koekappaleen koon ja muodon vaikutus puristuslujuuteen. TIEL 3200166
- 47/1993 Väsymissuorat tierakenteen mitoitusta varten. TIEL 3200172
- 59/1993 Valtatien 3 routamitoitus routanousun mukaan välillä Riihimäki P - Virala. TIEL 3200184
- 60/1993 Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1991-1992; Pohjaveden pinnan vaikutus, tienpinnan taipumamittaus eri lämpötiloissa, vertailu standardi paripyörä - Neste Oy:n kantavuusradan pyörä. TIEL 3200185
- 68/1993 Kuitukankaat tienrakennuksessa; Uudistetun VTT-GEO luokituksen mukaiset laatuvaatimukset. TIEL 3200193
- 71/1993 Nonwoven Geotextiles in Road Constructions. TIEL 3200193E
- 76/1993 Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus 1992-1993. TIEL 3200200
- 77/1993 Moreenin jalostaminen. TIEL 3200201

Geotekniikan informaatiojulkaisuja:

- 2/1993 Massanvaihto. TIEL 3200127
- 21/1993 Pengerpaalutus. TIEL 3200147
- 23/1993 Pohjanvahvistusmenetelmän valinta. TIEL 3200149
- 24/1993 Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet. TIEL 3200150

ISSN 0788-3722
ISBN 951-47-8761-7
TIEL 3200205